



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

KOMPLEXNÍ MODELY SVOZU ODPADŮ

COMPLEX WASTE COLLECTION MODELS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vlastimír Nevrlý

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

BRNO 2020

ABSTRAKT

Předmětem dizertační práce je řešení logistických systémů v kontextu odpadového hospodářství. Práce začíná rozsáhlou rešerší v oblasti modelování různých situací z dopravního řetězce odpadu. Jsou zde představeny různé typy praktických úloh z oblasti operačního výzkumu aplikovatelné v odpadovém hospodářství. Jejich možnosti rozšíření a modifikace jsou analyzovány pro využití u investorů, technických služeb či poskytovatelů svozových služeb. Podstatnou částí práce je identifikování klíčových parametrů v oblasti svozu odpadu na úrovni měst a mikroregionů. Na základě požadavků z praxe jsou definovány výzvy vztahující se k vylepšení rozhodovacích a plánovacích systémů. Na základě analýz bylo zjištěno, že dostupné techniky jsou pro praktické problémy nedostatečné. Pro oblast změn a návrhů svozových systémů (návrh a úprava tras, volba vozového parku, plán svozu apod.) chybí postupy, které by zahrnovaly celou škálu provozních podmínek a parametrů. Okrajové podmínky úlohy postihující reálné požadavky jsou značně variabilní.

Práce představuje komplexní přístup, který je rozdělen do několika fází. Příprava a analýza vstupních dat se zaměřovala především na tvorbu dopravní infrastruktury, alokaci sběrných nádob a jejich párování na síť, které navíc redukuje velikost úlohy. Dále byl navržen postup pro dodržování pravidel silničního provozu pomocí penalizační funkce a implementován algoritmus pro definování imaginárních hran, které umožní rozlišovat frekvenci svozu na vybraných segmentech sítě. Pro redukcii velikosti úlohy byl dále navržen algoritmus shlukování segmentů, který umožní výpočet svozu i pro rozsáhlejší oblasti. Vstupní parametry týkající se času obsluhy a naplněnosti sběrných nádob jsou rozpracovány do většího detailu, jelikož nejvíce ovlivňují výsledky úlohy. Podstatným přínosem je také algoritmus generující inicializační řešení z historických svozů. V rámci související publikační činnosti byla definována environmentální kritéria k vyhodnocení globálních a lokálních dopadů přepravy a zpracování odpadu.

Výstupy práce slouží především k analýze svozových systémů, k podpoře rozmístění sběrných nádob, plánování svozových tras, časových rozvrhů a dimenzování velikosti vozového parku. Navržené algoritmy byly testovány na několika případových studiích, které prokázaly širokou aplikovatelnost komplexního nástroje v oblasti logistiky odpadů. Přestože je práce zaměřena na modelování svozu komunálního odpadu, využitelnost implementovaných postupů je možná i v dalších oblastech odpadového hospodářství či jiných odvětvích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Opadové hospodářství, svoz odpadu, matematické programování, plánování, heuristiky.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEVRLÝ, V. Komplexní modely svozu odpadu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 76 s. Školitel: prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

ABSTRACT

The subject of this doctoral thesis is the solution of logistics systems in the context of waste management. The work begins with an extensive research in the field of modelling various situations from the waste transportation chain. There are presented multiple types of practical tasks in the area of operation research applicable to waste management. Their possibilities of extension and modification are analysed for use by investors, technical services or waste collection service providers. An essential part of the work is the identification of critical parameters in the waste collection at the level of municipalities and micro-regions. Based on practical requirements, challenges related to the improvement of decision-making and planning systems are defined. The available techniques proved to be insufficient for practical problems. For the area of changes and designs of collection systems (design and modification of routes, choice of the vehicle fleet, collection plan, etc.) there are no procedures that would include a whole range of operating conditions and parameters. The boundary conditions of the task affecting fundamental requirements are highly variable.

The thesis presents a comprehensive approach, which is divided into several phases. The preparation and analysis of input data focused mainly on the creation of transport infrastructure, allocation of waste collection containers and their pairing to the network, which also reduces the size of the task. Furthermore, a procedure for compliance with the rules of the road was designed using a penalty function, and an algorithm for defining imaginary edges was implemented, which will allow distinguishing the frequency of collection on selected network segments. To reduce the size of the task, a segment clustering algorithm was also designed, which will enable the calculation of the collection even for larger areas. Input parameters related to operating time and fullness of collection containers are elaborated in greater detail, as they most influence the results of the task. A great benefit is also the algorithm generating the initialization solution from historical routes. As part of the related publishing activities, environmental criteria were defined to evaluate global and local impacts of waste transportation and treatment.

The outputs of the thesis are used primarily for the analysis of collection systems, to support the deployment of waste containers, planning collection routes, time schedules and dimensioning the size of the vehicle fleet. The proposed algorithms were tested in several case studies, which proved the broad applicability of a comprehensive tool in the field of waste logistics. Although the thesis is focused on modelling the collection of municipal waste, the usability of the implemented procedures is possible in other areas of waste management or other sectors.

KEYWORDS

Waste management, waste collection, mathematical programming, scheduling, heuristics.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petr Stehlíka, CSc., dr. h. c., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 3.9. 2020

.....

Ing. Vlastimír Nevrlý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému školiteli prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c., školitelům specialistům doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. a Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D. za náměty a připomínky při zpracování této práce.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	8
SEZNAM ZKRATEK.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ.....	10
1 ÚVOD.....	11
1.1 MOTIVACE	11
1.2 ODPADOVÉ PROUDY.....	13
1.3 DYNAMICKÉ PLÁNOVÁNÍ	14
1.4 ENVIRONMENTÁLNÍ POHLED.....	14
1.5 VÝZVY A NÁMĚTY	15
2 REŠERŠE ODBORNÉ LITERATURY	17
2.1 SVOZOVÉ ÚLOHY	17
2.2 DISTRIBUČNÍ A LOKAČNÍ ÚLOHY	21
2.3 SÍŤOVÉ A ALOKAČNÍ ÚLOHY	22
2.4 SYSTÉMY SBĚRU ODPADU	23
2.5 VSTUPNÍ DATA, ÚČELOVÁ FUNKCE A ŘEŠITELNOST MODELU.....	24
2.6 PŘÍNOS A MEZERY V PŘÍSTUPECH SOUČASNÉHO VÝZKUMU	26
3 PŘÍPRAVA A PŘÍSTUPY KE ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT	32
3.1 PRODUKCE ODPADU	32
3.2 SBĚRNÉ NÁDOBY	33
3.2.1 EXISTUJÍCÍ ROZMÍSTĚNÍ	33
3.2.2 NÁVRH ROZMÍSTĚNÍ	34
3.3 VOZOVÝ PARK.....	36
3.4 INFRASTRUKTURA	37
3.4.1 VZDÁLENOSTI.....	37
3.4.2 ČASOVÁ NÁROČNOST SVOZU	40
3.4.3 PŘEPRAVA ODPADU A ZPRACOVATELSKÉ ZAŘÍZENÍ	41
3.4.4 REDUKCE ÚLOHY.....	42
3.5 EMISE	44
4 MATEMATICKÉ MODEL Y A HEURISTIKY	47
4.1 NÁVRH DYNAMICKÉHO VRP MODELU	47
4.2 STARTOVACÍ ŘEŠENÍ Z REÁLNÉHO MONITORINGU SVOZU ODPADU	48

4.3	PENALIZACE PRO PŘEKROČENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	50
4.4	NÁVRH SHLUKOVACÍHO ALGORITMU PRO SBĚRNÉ SEGMENTY	51
5	PŘÍPADOVÉ STUDIE DÍLČÍCH PROBLÉMŮ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	52
5.1	ODHAD NÁKLADŮ NA SVOZ A SBĚR <i>BRKO</i>	52
5.2	INTENZITA DOPRAVY PŘI SVOZU ODPADU DO PLÁNOVANÉHO <i>ZEVO</i> V PLANÉ NAD LUŽNICÍ.....	54
5.3	ZHODNOCENÍ A OPTIMALIZACE SVOZOVÝCH PLÁNŮ PRO VĚTŠÍ MĚSTO – PLASTY	56
5.3.1	PŘEDPOKLADY A VSTUPNÍ PARAMETRY VÝPOČTŮ.....	56
5.3.2	POSOUZENÍ REÁLNÝCH SVOZŮ	59
5.3.3	OPTIMALIZACE HISTORICKÝCH SVOZŮ	60
6	ZÁVĚR A NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	64
	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	66
	LITERATURA.....	70

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Schématické znázornění vícekritériálního rozhodování.....	26
Obr. 2 Schématické znázornění pracovních aktivit	31
Obr. 3 Postup pro návrh rozmístění sběrných nádob.....	35
Obr. 4 Výsledky optimalizace sběrných nádob pro různá kritéria	35
Obr. 5 Algoritmus sestavení matice vzdáleností segmentů	37
Obr. 6 Infrastruktura a trasy s a bez penalizace	38
Obr. 7 Situace A – zavedení penalizační vzdálenosti při otáčení	39
Obr. 8 Situace B – zavedení penalizační vzdálenosti při otáčení	39
Obr. 9 Jednosměrná ulice s kontejnerem bez návaznosti na další infrastrukturu	40
Obr. 10 Identifikování směru sběru dané nádoby	42
Obr. 11 Schéma tvorby imaginárních hran (čísla ve sběrných nádobách symbolizují frekvenci svozu).....	43
Obr. 12 Algoritmus úpravy matic kvůli imaginárním hranám	44
Obr. 13 Možnosti přepravy odpadu s ohledem na cenu dopravy a průjezd obydlými oblastmi (Nevrlý et al., 2018)	45
Obr. 14 Příspěvek skleníkových plynů ve vztahu ke změně technologií a souvisejícím průměrným nákladům na celý řetězec zpracování odpadů (Nevrlý et al., 2019c).....	46
Obr. 15 Schéma principu navrženého VRP přístupu (Hrabec et al., 2019).....	47
Obr. 16 Algoritmus pro inicializaci řešení z historického monitoringu svozu	49
Obr. 17 Repair solution algorithm	49
Obr. 18 DivideRoute algorithm	50
Obr. 19 Penalizační funkce	51
Obr. 20 Algoritmus shlukování segmentů	51
Obr. 21 Výhled pro produkci BRKO v ČR (Šomplák et al., 2018a)	52
Obr. 22 Prognóza svozových tras BRKO v ORP Tábor v roce 2024	53
Obr. 23 Intenzita dopravy pro oba scénáře	55
Obr. 24 Lokace depa (bod A) a sběrného střediska (bod B) v rámci města	56
Obr. 25 Krabicové grafy naplněnosti pro různé dny obsluhy sběrných nádob.....	57
Obr. 26 Histogramy doby obsluhy sběrných míst	58
Obr. 27 Segmenty infrastruktury uvažované ve výpočtu	58
Obr. 28 Nájezd vozidel ve zvoleném svozovém týdnu	59
Obr. 29 Histogram efektivity svozů plastového odpadu v analyzovaném období	60
Obr. 30 Využití kapacit vozidel pro jednotlivé svozové trasy.....	60
Obr. 31 Srovnání reálného a navrženého svozu	61
Obr. 32 Distribuce pracovní doby – agregovaná data za týden	62
Obr. 33 Středecní svozová trasa pro vozidlo 1	63
Tab. 1 Výčet nejpoužívanějších heuristických přístupů	26
Tab. 2 Souhrn vybraných světových publikací.....	27
Tab. 3 Katalogová čísla vybraných odpadů.....	32
Tab. 4 Ukázka parametrů KUKA vozů a detail pro plastový odpad	36
Tab. 5 Odhadované intervaly obsluhy sběrných nádob podle typu	41
Tab. 6 Parametry nově navržených svozových tras pro týdenní horizont a data z monitoringu	61

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ALNS	<i>Adaptive Large Neighbourhood Search</i>
AP	<i>Assignment Problem</i>
ARP	<i>Arc Routing Problem</i>
BCO	<i>Bee Colony Optimization</i>
CEP	<i>Circular Economy Package</i>
CPP	<i>Chinesse Postman Problem</i>
ČR	<i>Česká republika</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GrA	<i>Greedy Algorithm</i>
GRP	<i>General Routing Problem</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HTP	<i>Human Toxicity Potential</i>
IRR	<i>Internal Rate of Return</i>
KO	<i>Komunální odpad</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
MŽP	<i>Ministerstvo životního prostředí</i>
NF	<i>Network Flow</i>
NPV	<i>Net Present Value</i>
OH	<i>Odpadové hospodářství</i>
ORP	<i>Obec s rozšířenou působností</i>
OSM	<i>OpenStreetMap</i>
PAYT	<i>Pay-As-You-Throw</i>
POH	<i>Plán odpadového hospodářství</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SKO	<i>Směsný komunální odpad</i>
TS	<i>Tabu Search</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
ÚPI	<i>Ústav procesního inženýrství</i>
ISOH	<i>Veřejný informační systém odpadového hospodářství</i>
VNS	<i>Variable Neighbourhood Search</i>

Zkratka	Význam
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i>
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>
ZEVO	<i>Zařízení na energetické využití odpadu</i>

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Význam
A_1, A_2	<i>Označení hran</i>
$a_1^{beg}, a_1^{end}, a_2^{beg}, a_2^{end}$	<i>Počáteční a koncové body hran A_1 a A_2</i>
d^T	<i>Celkově najetá vzdálenost [km]</i>
$n_1(x_1, y_1), n_2(x_2, y_2)$	<i>Označení bodů dopravní infrastruktury a jejich souřadnice</i>
t^{Lunch}	<i>Čas přestávky na oběd [h]</i>
t^{Serv}	<i>Součet dob obsluhy všech sběrných nádob ze svozového plánu [h]</i>
t^{Total}	<i>Celková doba svozu [h]</i>
t^{Unload}	<i>Čas potřebný k výsypu vozidla na koncovém zařízení [h]</i>
v_V	<i>Rychlost vozidla [km/h]</i>
RV	<i>Relativní překročení okrajové podmínky</i>
a, b, c, d	<i>Koeficienty penalizační rovnice</i>
$c(x_3, y_3)$	<i>Označení bodu se sběrnou nádobou</i>
$fitness$	<i>Vyjádření hodnoty účelové funkce</i>
$penal$	<i>Penalizační koeficient</i>
$threshold$	<i>Limitní hodnota</i>
u, v, w	<i>Vektory</i>

1 ÚVOD

Tato kapitola se věnuje aktuálním změnám v legislativě a trendům v odpadovém hospodářství (OH), které tvoří motivaci pro tuto práci. Kapitola obsahuje souhrn aktuálního stavu OH včetně číselného vyhodnocení, které tvoří základní motivaci pro řešení problémů z této oblasti. Další části jsou věnovány nově vznikajícím odpadovým proudům, potřebám dynamického plánování a environmentálnímu pohledu. Na závěr jsou vytyčeny výzvy a náměty, které by měly být řešeny v souvislosti s logistikou a strategickým plánováním OH.

1.1 Motivace

Rozvíjející se společnost má jako přímý důsledek produkci odpadů, které vznikají při výrobě a spotřebě produktů nebo při využívání služeb. Růst hrubého domácího produktu přímo koreluje s produkcí odpadu, což bylo potvrzeno např. v (Fu et al., 2015). Tuto vazbu lze dlouhodobě sledovat v zemích jako Rakouskou a Německo a je tedy očekáván i v méně vyspělých státech. Nejen na základě těchto prognóz v České republice (ČR) probíhá stejně jako v jiných zemích Evropy přechod k tzv. oběhovému hospodářství. Cílem této strategie je uzavřít cyklus každého výrobku jeho přímým znovuvyužitím, opravou nebo recyklací. Jako legislativní podpora byl v EU představen balíček Evropské komise k oběhovému hospodářství (*Circular Economy Package* – CEP), který dává členským státům konkrétní cíle a způsoby, jak jich dosáhnout v daném časovém horizontu (jeho první předložení bylo 2. 12. 2015). Jeho uvedení v platnost bylo v květnu roku 2018. Hlavní změny, které představuje, zasahují do směrnice o odpadech, směrnice o obalech a směrnice o skládkách odpadů (Směrnice EU 2018/850, 2018/851 a 2018/852). Obsah CEP by měl být implementován do platné legislativy členských států, a to v co nejkratší době. Podle aktuální úrovně skládkování se dají státy rozdělit na tři skupiny (vyspělé, přechodné, nevyspělé). ČR je typickým reprezentantem druhé skupiny, která je z pohledu vývoje nejzajímavější (Ferdan et al., 2015). V ČR se právě připravuje novela zákona o odpadech (s účinností nastavenou na 1. ledna 2021), která bude nahrazovat současně platný zákon č. 185/2001 Sb. (zákon o odpadech). Obsah CEPu by už v tomto zákoně měl být zohledněn. V souladu s legislativou se pak vždy na 10 let dopředu tvoří Plán odpadového hospodářství (POH), a to jak pro celou ČR, tak pro jednotlivé kraje a města. V současné době se jedná o POH zaměřený na období 2015–2024, který se řídí nařízením vlády č. 352/2014 Sb.

Jedním z cílů směrnice o odpadech je postupné navyšování recyklace složek komunálního odpadu (KO), kterého dle Ministerstva životního prostředí (MŽP) bylo v ČR v roce 2018 vyprodukováno 5 782 066 (v roce 2017 to bylo 5 690 585 t), což odpovídá produkci okolo 543 kg/obyv. Pro MŽP je provozován společností CENIA Informační systém odpadového hospodářství (ISOH), který slouží jako databáze veškerých dat souvisejících s produkcí a nakládáním s odpadem. Z celkového množství vyprodukovaného KO se v roce 2015 dle matematického vyjádření indikátorů OH recyklovalo 36 % (dle MŽP), přičemž dle CEPu je cílem dosáhnout minimálně 55 % v roce 2025, 60 % v roce 2030 a 65 % v roce 2035. V ČR je vyjádření indikátorů počítáno na základě dokumentu „Matematické vyjádření výpočtu „Soustavy indikátorů OH“ v souladu s vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, v platném znění“. Těchto cílů je však při současném trendu nárůstu recyklace nemožné dosáhnout pro zvolené časové horizonty. Jednou z cest, kterou se MŽP vydává ke splnění cílů, je projednávání postupného navyšování skládkovacího poplatku a zavádění recyklačních slev. Hodnota skládkovacího poplatku činila v roce 2018 500 Kč/t KO uloženého na skládku, přičemž do roku 2024 by mohla vystoupat až na 1850 Kč/t (plán MŽP). Větší zdanění nevyužitého odpadu se projeví zvýšením obecních rozpočtů. Obce mají

totiž, jakožto původci odpadu povinnost ho zpracovat. Důsledkem pak může být navýšení poplatků za sběr odpadu pro občany jednotlivých obcí. Další povinností obcí je zajišťovat tříděný sběr využitelných složek KO. Obce se můžou zapojit do systému firmy EKO-KOM, a.s. (autorizovaná obalová společnost), kde je možnost získávání odměn za zpětný odběr odpadů z obalů (v roce 2019 bylo zapojeno 6146 obcí, což odpovídá 99 % obyvatel ČR). Odměny jsou vypočítávány kvartálně a jejich výše závisí především na množství vytríděných odpadů a splnění limitních ukazatelů¹. Odměna může obcím pomáhat při snižování nákladů spojených s provozem OH.

Jednou z možností, jak předejít situaci větších nákladů za nakládání s KO, je postupně navýšovat míru separace (s ohledem na plánovaný růst skládkovacího poplatku). Toho lze dosáhnout zefektivněním systému sběru samostatně separovaných složek jako je papír, plast, sklo aj. Přidáváním nových sběrných nádob na tříděný odpad do oblastí, kde se zatím nevyskytují, se navýší počet občanů, kterým je třídění zpřístupněno. Dalším způsobem je také zahušťování sítě sběrných míst, čímž by se výrazně snížila docházková vzdálenost k nejbližšímu místu se separovaně sbíraným odpadem (vyšší komfort pro občany). Tato závislost byla prokázána v (Sheau-Ting et al., 2016), kde zároveň analyzovali další atributy, které ovlivňují separaci jako informovanost, motivace atd. Na základě těchto faktorů by měly být sběrné nádoby rozmísťovány tak, aby bylo dosaženo optimálního rozvržení celé sítě. Otázkou zůstává, kolik implementace nových sběrných nádob bude danou obec stát.

V první řadě se projeví pořizovací náklady nově instalovaných sběrných nádob, ale velice důležitým aspektem jsou i náklady na sběr a svoz daných komodit. Náklady na sběr se výrazně liší v závislosti na typu odpadu, přičemž nejvyšší jsou náklady na plast a papír, které jsou v ČR v průměru 7100 Kč/t resp. 4200 Kč/t odpadu. Konkrétní výše nákladů se mění v závislosti na oblasti a lokálních podmínkách (Institut pro udržitelný rozvoj měst a obcí, o.p.s.). Počet nových sběrných nádob však neovlivňuje náklady lineárně, a to z důvodu velikosti vozového parku či nerovnoměrné distribuci v lokalitě. Klíčovým faktorem k vyhodnocení vícenákladů pro přidané nádoby je zařazení do existujících plánů svozu. Při úpravě svozových plánů je nutné dodržet základní omezení, jako jsou časové, kapacitní a personální. Každý vozový park, ať už městských technických služeb či soukromé svozové firmy², má danou určitou vytiženost v rámci časových období. To znamená, že jeho celková týdenní kapacita je omezena (časová či kapacitní pro vozidlo v rámci dne/týdne, směnová pro zaměstnance atd.). Při nárůstu množství separovaného odpadu tak může dojít k překročení těchto omezujících limitů, a tak je nutné navýšit počet pracovníků nebo vozidel. Tyto změny mají za příčinu skokovou změnu v celkových nákladech na sběr tříděného odpadu (Gregor et al., 2017). Pro posouzení dostatečnosti dostupných zdrojů a optimální zařazení nových sběrných nádob však neexistuje vhodný nástroj, který by zohledňoval reálné parametry z technické praxe. Vzhledem k měnícím se legislativním podmínkám a současnému trendu OH směřujícímu k oběhovému hospodářství pak narůstá potřeba využití těchto funkcionalit.

Problémy v rámci OH byly identifikovány po celém světě. Čína stále čelí mnoha výzvám, které byly definovány v roce 2010 ve směru k udržitelnému nakládání s odpadem (Zhang et al., 2010). Produkce odpadu zde stále narůstá a mění se jeho složení. Mapováním problémů z oblasti OH se zabývala studie (Ghiani et al., 2014a). Byly zde identifikovány

¹ EKO-KOM, a.s., Smluvní odměny obcí, <https://www.ekokom.cz/cz/obce-a-mesta/odmeny-obci>.

² Aktuální trend vede k vytváření svazků obcí, které zakládají vlastní svozové společnosti, aby se vyhnuli tvrdým podmínkám a cenám za svozové služby velkých často nadnárodních firem. Nově vzniklé svazky obcí tak vytváří poptávku pro vyhodnocení potřebného vozového parku a návrh svozových tras.

taktické záležitosti, které souvisí s rozhodnutím na nižších úrovních územních celků. K těm patří rozdělení obsluhy do teritorií, vybrání dnů svozu pro typ odpadu a danou oblast, určení složení vozového parku a personálu. Další výzvy týkající se plánování a rozhodování v oblasti recyklace a separace pak byly představeny v (Bing et al., 2016).

Vzhledem ke zmíněným významným změnám v OH a jejím důsledkům, je nutné vyvíjet nástroje pro podporu rozhodování, pro plánování investic a pro udržitelnou ekonomickou stabilitu systému. Plánování svozových tras a s tím spojených technických parametrů je proto důležitější než kdy dřív. Při bezhlavém rozhodnutí bez zohlednění budoucích stavů produkce dílčích frakcí odpadů a jejich způsobu sběru, může docházet ke krizovým situacím (přetékání sběrných nádob, neobsloužení některých lokalit apod.) v systémech nakládání s odpady. Aby se těmto stavům dalo předcházet, nabízí se možnost sestavení a využití propracovaných matematických modelů, které by dokázaly zohlednit parametry z reálné praxe pro posouzení vhodných řešení v systémech nakládání s KO.

1.2 Odpadové proudy

Odpadové proudy se mění s vývojem společnosti a technologiemi. Obalové materiály se nahrazují za nové a zároveň přibývá množství separovaně sbíraných odpadů v důsledku legislativních změn. K těmto změnám patří např. také povinné třídění textilu a nebezpečných složek KO od roku 2025 (dle směrnic EU). Z hlediska nakládání s KO pak stojí za zmínku cíl pro skládkování (Směrnice o skládkování odpadů), přičemž cíl pro rok 2035 je skládkovat pouze 10 % produkce. Bez dopadu na obecnost budou v kontextu vývoje EU uváděny údaje KO v ČR. Pro srovnání byla v ČR v roce 2018 skládkována téměř polovina vyprodukovaného KO. Směrnice dále upravují cíle pro recyklaci konkrétních materiálů (obalové materiály, plast, dřevo, železné kovy, hliník, sklo, papír a lepenka).

Složení odpadu pak může hrát významnou roli při navrhování celého systému svozu. Příkladem může být kvantifikování KO na území Ghany pro všechny její regiony, které bylo provedeno v (Miezah et al., 2015). V odpadu z domácností bylo nalezeno velké množství biologicky rozložitelného odpadu, který může sloužit pro kompostování nebo pro výrobu biopaliv. Získání a následná logistika této frakce by měla být dále zkoumána. S odklonem významně zastoupené frakce ze směsného komunálního odpadu (SKO) je spojena nedávná změna (2014) v ČR, která ukládá obcím povinnost zajistit pro domácnosti místa pro odkládání bioodpadů. V posledních letech tak díky novele začal postupně vznikat nový odpadový proud. Povinnost obcí umožnit občanům separovat biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO) a to minimálně v období od 1. dubna do 31. října každého roku se ve většině obcí projevil zavedením hnědých sběrných nádob. Tato změna se týkala především zástavby s rodinnými domy, kde tohoto odpadu vzniká více než na sídlištích. Od 1. ledna roku 2015 tak rapidně přibývala produkce bioodpadu jakožto nového odpadového proudu. Analýzou dalšího vývoje v produkci bioodpadu se zabývala práce (Šomplák et. al., 2018b), kde byl odhadován potenciální trend budoucí produkce za použití statistické regrese a S-křivek. Další prognostický přístup pro vývoj produkce KO by za pomoci regrese představen v (Ghinea et al., 2016). Data o budoucích produkcích by mohla sloužit k posouzení dostatečnosti současného a budoucího vozového parku. Zároveň však bude také potřeba sestavit nové svozové trasy a rozmístit sběrné nádoby. Tímto vzniká prostor pro implementaci těchto faktorů do matematického modelu a posouzení všech parametrů, kterých se změny týkají.

Jedním z důležitých rozhodnutí je i volba typu instalovaných sběrných nádob. Nyní se v ČR nejčastěji využívají volně stojící sběrné nádoby o objemech od 120 do 1100 litrů. Nicméně v některých částech města není vhodné jejich využití (vzhledem k velké produkci v dané lokalitě – prostorové omezení) nebo nevhodně zasahují do kulturního či historického charakteru lokality. V takovém případě se začínají využívat kontejnery polo-podzemní nebo podzemní o objemech 3 až 5 m³. Využití podzemních kontejnerů je však spjato s velkými pořizovacími náklady (statisíce až milion korun pro vybudování jednoho hnízda), přičemž technické parametry vozidel musí být schopny podzemní kontejnery obsluhovat (nová vozidla či úprava stávajících). Vzhledem k velkému objemu sběrných nádob jich není nutné vybudovat tolik. Posouzení vhodnosti tohoto systému z pohledu ekonomiky (případně dalších aspektů) patří k omezeně probádaným odvětvím OH s málo četnou kvantifikací. Dalším způsobem je pytlový sběr, který se běžně využívá v mnoha obcích s rozptýlenou zástavbou.

1.3 Dynamické plánování

Důležitým aspektem poslední doby je i rozvíjející se trend tzv. *Smart solution*. V kontextu OH se jedná například o využití čipů v kontejnerech (Ramson a Moni, 2017). Tyto čipy pak můžou snímat více či méně informací v závislosti na typu kontejneru. Nejčastěji zkoumaným parametrem je však stav naplněnosti kontejneru. Procentuální naplněnost sběrných nádob může být využita pro efektivnější plánování sběru odpadu. Nicméně k tomu, aby tento způsob sběru mohl být využit v praxi, je nutné zohledňovat data všech snímaných nádob najednou. To pak znamená analyzovat vývoj naplněnosti v průběhu týdne (nebo jiného časového horizontu) a posuzovat rozdělení svozů podle kapacitních možností vozového parku jednotlivých dní. Při svozu s měnící se produkcí (množství odpadu ve sběrné nádobě) se jedná o vytváření dynamických plánů pro každý den na základě přijatých dat. Nejčastější využívaná frekvence zasílání shromažďovaných dat je jednou denně, a to z pravidla ráno (informace o aktuální naplněnosti je zasílána v brzkých ranních hodinách před samotným svozem). To znamená sestavení, respektive upravení svozových plánů každý den s aktualizací dle čerstvě přijatých dat. Vzhledem k tomu, že svoz často začíná v ranních hodinách, tak by čas výpočtu neměl přesáhnout pár hodin.

1.4 Environmentální pohled

Ekonomické kritérium není jediným faktorem pro vyhodnocení systému sběru odpadu. Environmentální dopad je také důležitý a jeho posouzení je často nutným podkladem pro jakékoliv změny. Běžně využívaná metodika pro rozhodování o lepším řešení pro daný problém je tzv. *Life Cycle Assessment* (LCA). K vyhodnocení globálního dopadu na životní prostředí se nejčastěji využívá tzv. *Global Warming Potential* (GWP), který zohledňuje teplo absorbované skleníkovými plyny. Posouzení vlivu způsobu zpracování na životní prostředí pomocí různých indikátorů bylo provedeno v (Jeswani a Azapagic, 2016) pro Velkou Británii. Technologie zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO) zde byla porovnávána se skládkováním, a to s přínosy i bez přínosů z nahrazení fosilních paliv a výroby energie. V souvislosti se svozem odpadu se jedná o vyhodnocení vlivu emisí z vozidel (KUKA vozy). Při výpočtu dopadu na životní prostředí pomocí GWP metodiky se pak produkce každého polutantu převádí na jednotku CO₂eq, která je všechny sjednocuje na jednu hodnotu daného indikátoru. Další využívané indikátory jsou pak *Human Toxicity Potential* (HTP) pro vliv na obyvatelstvo, *Abiotic Depletion Potential* pro kvantifikování vyčerpání surovin, *Acidification Potential*, *Eutrophication potential*, *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential*,

Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, Ozone Layer Depletion Potential, Photochemical Oxidant Creation Potential či *Terrestrial Ecotoxicity Potential* analyzující vlivy na ozonovou vrstvu, živočichy, pitnou vodu, ocenány, rostliny či půdu. Důležitým pohledem při vyhodnocení logistických záměrů je lokální dopad na populaci, který může být počítán při zohlednění emisí přímo v místě produkce působící na populaci žijící v okolí. Vyhodnocení OH podle HTP a dalších třech indikátorů bylo počítáno pro několik oblastí v Itálii (Rigamonti et al., 2013). Výsledky ukázaly na výrazné rozdíly napříč oblastmi, a to přestože se jednalo o stejný region. Takto uvažovaný lokální dopad na obyvatelstvo může být dalším kritériem při posuzování vhodnosti dopravních cest, infrastruktury a souvisejících projektů.

Životní prostředí hraje klíčovou roli pro změny v OH. Vliv na životní prostředí z nakládání s KO byl vyhodnocen pro Spojené státy v (Weitz et al., 2002) mezi lety 1974 až 1997. Výsledky ukázaly, že směřování OH uspořilo potenciální emise skleníkových plynů navzdory zvýšené produkci odpadu.

Jak bylo výše zmíněno, trend současné doby ukazuje jasným směrem k cirkulární ekonomice a dodržování hierarchie nakládání s odpady, přičemž je kladen důraz na maximalizování míry separace a recyklace. Nicméně v článku (Haupt et al., 2018) byla zkoumána optimální míra separace a počet sběrných míst na historických datech ze Švýcarska. Pomocí statistických metod bylo zjištěno, že recyklování PET lahví může být od určité chvíle neefektivní z pohledu životního prostředí (výsledek je odečten z nelineárního průběhu závislosti, viz (Haupt et al., 2018)). Tento efekt může být pozorován převážně u dalších komodit, kde má nahrazení primárních materiálů nižší přínos, než je tomu u PET.

1.5 Výzvy a náměty

Z výše uvedených příkladů vzniká celospolečenská poptávka po komplexním nástroji, který dokáže analyzovat systém sběru odpadu z pohledu různých kritérií a navrhnout ekonomicky, sociálně či ekologicky vhodné řešení. Z inženýrského pohledu by měla úloha umět posoudit:

- schopnost existujícího vozového parku obsloužit konkrétní území dle zadaných parametrů,
- vyhodnotit vhodnost svozových tras a navrhnout změny,
- optimálně rozmístit sběrné nádoby v rámci sítě,
- identifikovat nevhodně umístěné kontejnery a jejich kapacitu,
- posoudit různé systémy sběru jak z environmetálního hlediska, tak z pohledu nákladovosti,
- zahrnutí neurčitosti některých vstupních parametrů.

Ve všech zmíněných aplikacích by se mohla uvažovat jak současná produkce odpadu, tak její budoucí stav odhadnutý v souladu s historickými daty a se stanovenými cíli OH. Analýza vývoje produkce v krátkém časovém horizontu by měla být také nedílnou součástí celého výpočtového modulu, a to z důvodu možnosti budoucího dynamického svozu.

Záměrem dizertační práce bude sestavit a implementovat výpočtový systém pro koncepční řešení mikroregionálních problémů a budoucích stavů OH, který může zohledňovat infrastrukturu dané lokality, obyvatelstvo, čas, typy sbíraných odpadů, parametry vozidla vozových parků, dopady na životní prostředí a celkovou nákladovost.

Postup prací bude směřovat k detailnějšímu popisu sítě, nad kterou jsou výpočty prováděny. Část práce se bude zabývat návrhem dopravní sítě, která zahrnuje pravidla dopravy, konstrukci infrastruktury a určení časů přepravy. Bude diskutováno rozmístění sběrných nádob a jeho potenciální úprava, případně zcela nový návrh. Jednotlivé faktory, které mohou být uvažované v této komplexní úloze, jsou rozebrány v dalších částech textu. Současné poznání podobných problémů je předmětem další kapitoly, kde jsou shrnuty způsoby formulace problémů a metodika pro jejich řešení.

2 REŠERŠE ODBORNÉ LITERATURY

Efektivní OH přispívá k ekonomické a ekologické udržitelnosti. V důsledku přibývajících provozních požadavků a měnícím se způsobům fungování systémů je nicméně nutný vývoj nových metod v různých oblastech. Pro některé producenty odpadu (obce) je vytváření plánu svozu jednoduché z důvodu malého rozsahu celého problému. S využitím elementárních znalostí a výpočtů lze vozidlu sestavit týdenní svozový plán a v průběhu roku ho přizpůsobovat podle aktuální sezóny a potřeb. Toto tvrzení však lze konstatovat pouze pro malé oblasti, kde se vyskytuje řádově desítky sběrných nádob konkrétního typu odpadu. Pro rozsáhlejší území je vhodné přejít k sofistikovanějším metodám založeným nejčastěji na matematickém programování a výpočetních algoritmech, které z něj mohou vycházet. Rozsáhlou aktuální rešerší v oblasti operačního výzkumu se zabývali v (Barbosa-Póvoa et al., 2018), kde byly identifikovány možnosti a výzvy dalšího vývoje. Článek analyzoval vývoj počtu publikací v jednotlivých odvětvích a dále byl zaměřen obecněji na rozhodování a plánování, které bylo rozděleno na strategické, taktické a operační, a to i s ohledem na přístup k datům (deterministický, stochastický či robustní).

Historie svozových úloh sahá někam do 18. století, kdy přišel neznámý muž s nápadem, že by ve městě Königsberg (dnes Kaliningrad) chtěl přejít přes všech 7 mostů, které vedou přes rozvětvenou řeku kolem menších ostrovů. Nicméně chtěl každý most překonat právě jednou, což vyvolalo otázku, zda existuje spojitá cesta, která splní tyto požadavky. Tento problém byl vyřešen až matematikem ze Švýcarska, Leonhardem Eulerem v roce 1735. Jeho řešení a následné zobecnění problému přispělo ke vzniku důležitého matematického odvětví nazývaného Teorie grafů.

Se zajímavým problémem přišel matematik Kwan Mei-Ko, který byl po nějakou dobu zaměstnán jako pošťák, odtud tzv. problém čínského listonoše (*Chinese Postman Problem* – CPP). Přestože problém studoval už v roce 1960, jeho příspěvek byl přeložen do angličtiny až v roce 1962. Úkolem tohoto problému je najít nejkratší průchod daným grafem, přičemž každá hrana musí být navštívena minimálně jednou. Velice blízký vztah k CPP má problém obchodního cestujícího (*Travelling Salesman Problem* – TSP). TSP je zřejmě nejznámější problém z oblasti operačního výzkumu. Obchodní cestující musí navštívit každé z okolních měst právě jednou a poté se navrátit do počátečního města. Cílem je pak nalézt pořadí, ve kterém by měl tato města navštívit, tak, aby jeho cesta trvala co nejkratší dobu. Nicméně vztah TSP a CPP byl zobecněn v (Orloff, 1974), kde byl definován tzv. General Routing Problem (GRP), na který bylo navázáno v (Lenstra a Kan, 1976) dalšími úpravami a opravami. Tyto úlohy však často spadají do kategorie výpočtově složitých problémů (časová náročnost), obzvláště s rostoucí velikostí instance (časová náročnost byla srovnávána pro heuristicky generované úlohy v závěrečné práci (Nevrlý, 2014)). V roce 1976 byl představen Christofidesův algoritmus, který dokáže aproximovat řešení TSP na 1,5násobek optimálního řešení pro úlohy, které splňují vlastnosti metrického prostoru. Postupem času a s vývojem různých algoritmů pak byla v článku (Glover, 1986) umělá inteligence identifikována jako směr budoucího vývoje. Heuristiky se tak dostaly do popředí vzhledem k jejich efektivitě pro složité úlohy celočíselného programování.

2.1 Svozové úlohy

Sběr a svoz odpadu je velice úzce spjat s úlohou tzv. *Vehicle routing problem* (VRP), která je zobecněním TSP, kde má popelářské auto za úkol obsloužit danou množinu sběrných nádob a dodržovat přitom kapacitu vozidla. Tato základní úloha však pro reálné problémy

není dostatečná, a tak v průběhu času vznikaly její různé modifikace. V nich přibývaly požadavky na vozový park, kontejnery, časový harmonogram či typ infrastruktury. VRP však není jedinou úlohou související s logistickým plánováním. Další v praxi využívanou formulací je tzv. *Arc routing problem* (ARP), který je její analogickou verzí se zaměřením na obsluhu hran (zobecnění CPP) na místo uzlů. Tyto dva problémy se však z matematického pohledu dají mezi sebou vzájemně převádět.

Výše zmíněné typy úloh lze kombinovat a dále k nim přidávat požadavky, které odpovídají různým technickým podmínkám reálných problémů. Mezi doposud publikované variace svozových úloh patří omezení následujících typů:

- *Periodic* – plánování v delším časovém horizontu, tj. dva dny, týden, měsíc apod.
- *Capacitated* – omezený počet obsluhovaných zákazníků nebo limitující kapacita vozidla.
- *Multi-Trip* – umožnění opakovaného svozu po uspokojení poptávky a započeti nové trasy.
- *Multi-Facility/Depot* – více zpracovatelských zařízení omezených např. denní kapacitou, technologií a typem zpracovávané komodity, různá místa dep pro vozidla.
- *Fleet Sizing/Composition* – uvažování vozového parku s více vozidly, ta mohou být stejného typu (*homogenous*) nebo odlišná technologicky, kapacitně či obsluhou personálu (*heterogenous*).
- *Multi-Commodity/Compartment* – více komodit v rámci plánování, možnost separátního nebo společného uspokojování poptávky (kapacitní omezení jednotlivých komodit nebo dána celková kapacita).
- *Time-Restricted* – omezení pracovního času (délka směny), omezená doba pro jednu trasu, pauzy mezi jízdami.
- *Time Windows* – požadavek na svoz ve vyhrazených časových úsecích (intervalech) pro jednotlivé komodity.
- *Route-Consumption* – omezené množství pohonných hmot, akumulátor elektromobilu apod.
- *Customer-Requirements* – obsluhu zákazníka vozidlem požadovaných parametrů.
- *Pickup and delivery* – vozidla při obsluze zároveň rozváží a vyzvedávají produkt.
- *Split Delivery* – rozdělení poptávky zákazníka mezi několik vozidel.
- *Inventory* – požadavek na udržování zásob zboží u zákazníků.

Možnosti modifikací CPP shrnuli Eiselt, Gendrau a Laporte ve dvou navazujících článcích (Eiselt et al. 1995a a Eiselt et al. 1995b). Byla zde nastíněna i idea několika možných způsobů řešení včetně algoritmů. O několik let později byla sepsána kniha (Dror et al. 2000), která shrnula dosavadní poznatky z oblasti ARP, přičemž byla zaměřena jak na teorii, tak na řešení daného problému a aplikace, ve kterých lze ARP využít. Iterativní heuristický algoritmus pro řešení svozové úlohy s několika omezeními a výstupy navrhli Clark a Wright již v roce 1964 (Clark a Wright, 1964). Laporte pak představil rešerši shrnující algoritmy a pokrok za 50 let od formulace VRP (Dantzig a Ramzer pod názvem *The Truck Dispatching Problem*) v přehledové monografii (Laporte et al., 2009). Ovšem s rozvíjející se dobou a technologií byly stále představovány nové modifikace svozových úloh a algoritmy pro jejich řešení.

Kombinací ARP a VRP se zabývali v (Oppen a Løkketangen, 2006) za pomoci *Tabu Search*. Byla zde představena agregace uzlů tvořících hrany pro zmenšení velikosti úlohy, což přineslo snížení výpočtového času i zlepšení kvality nalezeného řešení. V (Cattaruzza et al., 2014) byl představen *memetic algorithm* pro řešení *Multi Trip VRP*, který je založený na rozdělovací proceduře. Je zde uvažován větší vozový park a optimalizován celkový čas strávený na trasách. Aplikace rozmístění určitých zařízení se analyzovala v (Schiffer a Walther, 2017). Zde byl představen model pro nalezení vhodných míst nabíjecích stanic pro elektrický logistický vozový park s přihlédnutím k simultánnímu sestavování tras dle poptávky zákazníků. Model je představen jako robustní vůči náhodným poptávkám, rozmístění zákazníků a časovým oknům pro provedení služby. Model je pak přeformulován pro řešení heuristickým algoritmem – kombinace *adaptive large neighbourhood search* (ALNS) a dynamického programování. Výsledky navrhnutého přístupu ukázaly na úsporu v nákladech při využití robustního plánování oproti běžným deterministickým metodám.

V případě aplikací v OH bylo zkoumáno mnoho omezení z reálné praxe. V článku (Teixeira et al., 2004) byl zkoumán více-typový svaz tříděného odpadu na delší časový horizont (měsíc). K řešení byla využita tří fázová heuristika skládající se z geografického přiřazení k vozidlům, rozdělení jednotlivých frakcí odpadu ke konkrétním dnům měsíce a z plánování svozových tras.

Důležitou roli ve svozu odpadu hraje spotřeba pohonných hmot. Spotřeba bývá často uvažována jako lineární násobek ujeté vzdálenosti, nicméně v (Tavares et al., 2008) bylo poukázáno na výhodnost využití GIS systémů pro zohlednění terénu ve svozových úlohách. Byly zde minimalizovány náklady odvozené od spotřeby a výsledky identifikovaly úsporu až 12 % v reálné studii.

Dále je možné uvažování částečně naložených vozidel na začátku svozu. Přestože to často není popelářům dovoleno (obtíže skrz monitoring a sběr provozních dat), poslední jízda někdy končí v depu namísto zpracovatelského zařízení z důvodu zkrácení denní směny. Plánování, které tuto možnost povoluje, může mít i pozitivní vliv na náklady. A to obzvláště u komodit jako je sklo, kov, plast nebo papír, kde pak může být uvažováno s návratem do vozovny s povoleným částečným nákladem po poslední svozové trase. Tato funkcionalita byla společně s delším plánovacím časovým horizontem implementována do modelu v (Hemmelmayer et al., 2013). Pro představený model byl navržen heuristický algoritmus založený na *Variable Neighbourhood Search* (VNS), který zároveň překonal předchozí výsledky.

Mobilním sběrem odpadu se zabývali v článku (Nowakowski et al., 2018), kde byly navrhovány místa pro zastavení vozidla. Sběrná mobilní místa zde byla vybírána na základě poptávky (požadavku) občanů, a to pro konkrétní časová okna. Pro řešení problému byly testovány 4 různé heuristické algoritmy – *Tabu Search* (TS), *Greedy Algorithm* (GrA), *Simulated Annealing* (SA), *Bee Colony Optimization* (BCO). Dle testování na 3 různých reálných instancích (Tokyo, Philadelphia, Warsaw) s rozdílnou zástavbou a infrastrukturou pro sběr tzv. *Waste Electrical and Electronic Equipment* (WEEE) se ukázal algoritmus SA jako nejvhodnější pro zadaný problém. Cílem navrženého řešení úlohy zde bylo snížit náklady a emise produkované při přepravě odpadu.

Srovnání fixního svozu s dynamickým bylo představeno v článku (Akhtar et al., 2017). Pro nalezení svozových tras byl využit *Backtracking Search Algorithm*, který využívá limitní hodnotu pro každou nádobu a vyhodnocuje její naplněnost. Výsledky zde byly porovnávány

proti běžnému statickému svozu z pohledu skleníkových plynů, nákladů, celkově najeté vzdálenosti a spotřeby. Dynamický přístup aplikovaný pro čtyřdenní horizont nabídl úsporu ve všech zkoumaných aspektech, čímž představuje potenciálně využitelný nástroj pro budoucí optimalizaci tras v místech, kde se monitoruje naplněnost sběrných nádob.

Existující systémy mají své nedostatky i z důvodu špatné kooperace mezi jednotlivými oblastmi. V případě svozu a následného logistického řetězce obalových odpadů se může jednat o identifikování vhodných míst pro sklad, vozovnu či úpravnu odpadu pro danou oblast. Ve studii (Ramos et al. 2014a) byl analyzován vliv cílového stanoviště pro výsyp odpadu na svozové náklady. Více menších oblastí bylo integrováno v rámci výpočtu za účelem identifikování potenciálu pro změnu. Jednotlivé sběrné nádoby byly agregovány do větších oblastí pro zjednodušení svozové části, aby byl umožněn makroskopičtější pohled, přičemž kapacity překládacích stanic i koncových zařízení (třídící linky) byly také zohledněny. Navázala na to analýza plánování svozu recyklovatelného odpadu z hlediska ekonomiky a životního prostředí (Ramos et al., 2014b).

Operace s odpadem mohou být závislé i na jeho typu a vlastnostech, např. svoz kuchyňského odpadu byl plánován pomocí heuristického algoritmu v (Laureri et al., 2016). Byl zde představen postup na míru vyvinutý pro tento typ odpadu kvůli svým vlastnostem, jako je velká hmotnost oproti objemu či velká variabilita v poptávce mezi jednotlivými sběrnými místy (restaurace, bary, supermarkety atd.). Testovací výpočty tohoto algoritmu jsou ukázány na historickém centru v Janově a porovnány se současně využívaným plánem s vyhodnocením částečných úspor.

Úspory lze zajistit i robustním pohledem na svoz odpadu. Ten byl představen v (Tirkolaee et al., 2018), kde byl formulován *Periodic Capacitated ARP*. Řešení zde bylo nalezeno pomocí SA algoritmu, přičemž byla poptávka po svozu odpadu uvažována náhodně.

Svoz více komodit najednou je v poslední době testován v praxi (převážně pro různé barvy skla). Tato úloha má svá specifika, obzvlášť pokud se uvažuje flexibilní velikost jednotlivých nádob. V (Henke et al., 2018) byl představen algoritmus založený na *Branch-and-Cut* metodě pro vyřešení tohoto problému. Při testování do 50 sběrných míst dokázal algoritmus dosáhnout optimálního řešení efektivněji než dříve představené algoritmy.

K zajištění efektivnějšího a úspornějšího systému sběru se začínají také využívat snímače ve sběrných nádobách. Jejich reálné využití je možné hlavně díky snižující se pořizovací ceně. To otevírá prostor pro efektivnější plánování svozu odpadu. Posouzení rozdílů statického plánování oproti dynamickému bylo provedeno v (Johansson, 2006) na reálných datech ze Švédska pro KO. Byla zde provedena simulace na bázi dvou let, která analyzovala nákladovost a další indikátory pro navržení optimálního systému, přičemž dynamické plánování vykázalo lepší výsledky. Implementace sítě bezdrátových senzorů ve sběrných nádobách byla analyzována v (Ramson a Moni, 2017). Byla zde představena monitorovací aplikace pro zjištění aktuálního stavu naplněnosti. Dále byla zkoumána životnost těchto senzorů a jejich použitelnost v oblasti KO. Využití dat ze senzorů ve sběrných nádobách tak může snížit provozní náklady celého systému. Tzv. *smart waste collection* je v poslední době implementován na různých úrovních. Ramos et al. (2018) představili tři možné přístupy k sestavení dynamických svozových plánů, které jsou založeny na údajích o naplněnosti sběrných nádob. Modely navrhuji optimální dny svozu s ohledem na aktuální naplněnost a průměrnou denní akumulaci odpadu s povoleným

přetečením daného počtu nádob. Přístupy jsou testovány na základě dat od společnosti Valorsul pro tříditelný odpad v Portugalsku. Výsledky ukázaly na existující potenciál pro zvýšení efektivity a zvýšení zisku v řádu několika procent.

Přehled existujících a nově vyvíjených variant řešení problémů svozu odpadu byl představen v rozsáhlé rešerši (Vidal et al., 2020). Nové modely by měly brát v úvahu různé cíle a metriky výkonnosti. Ty mohou integrovat vyhodnocení svozu s dalšími taktickými rozhodnutími. Jejich cílem by mělo být také zachytit detaily, které představují zásadní aspekty moderních dopravních řetězců. Rešerše (Vidal et al., 2020) tak ukazuje na současné nedostatky, poslední směřování vývoje, a hlavně nové výzvy při návrhu a vyhodnocování svozových úloh.

2.2 Distribuční a lokační úlohy

Svou roli v plánování svozu má i zpracovatelské zařízení a jeho umístění, tzv. *Location routing problem* (LRP). Umístění takového zařízení může mít velký vliv na celkové přepravní náklady, a tak je v případě plánování nového zařízení vhodné navrhnout strategickou polohu. Na lokální úrovni se jedná především o úpravná zařízení, jako jsou třídící a dotřídňovací linky, překládací stanice či depo pro vozidla, jelikož jeho umístění přímo souvisí se začátkem a koncem každodenních tras. S ohledem na přibývajícím počet separátně sbíraných složek KO, a i jejich množství je také potřeba optimálně rozmístit sběrné nádoby. S ohledem na konkrétní omezení tato úloha spadá do kategorií *Set Covering/Partitioning Problem* (pokrytí obyvatelstva sběrnými místy) nebo *Assignment Problem* (AP). S tímto také souvisí analýza možností a dostatečnosti vozového parku. Nákup nových vozidel je investicí na několik let, a tak je podpora při rozhodování velice důležitá. Touto částí plánování se zabývají úlohy typu *Fleet Composition/Sizing* (FCS).

Rozsáhlou rešerši na LRP lze nalézt v (Prodhon a Prins, 2014), kde byly klasifikovány jednotlivé varianty úloh a k nim přiřazeny nejvhodnější algoritmy. Průmyslové aspekty v oblasti FCS byly přehledně představené v (Hoff et al., 2010), přičemž výzvy pro budoucí vývoj v těchto úlohách byly definovány jak pro námořní, tak silniční problémy.

Optimálním rozmístěním sběrných míst se zabývali v (Ghiani et al., 2012). Formulace MILP modelu zároveň rozhodovala o kapacitách jednotlivých sběrných nádob. Na základě denní produkce byly definovány oblasti s využitím shlukování. Řešení je nalezeno pomocí dvoufázové heuristiky. Výsledky odhalily úspory oproti reálné situaci v řádech desítek procent. Na tuto studii navázal článek (Ghiani et al., 2014b), kde k optimálnímu rozmístění sběrných míst přidali rozhodnutí o zónování pro svozová vozidla. K celému procesu byly představeny konstruktivní heuristiky. Algoritmy tak zajistily kompatibilitu vozidel a sběrných nádob v rámci stejných sběrných míst. To vedlo k úspoře potřebného počtu vozidel a zkrácení ujeté vzdálenosti.

Reálná praxe ukazuje, že rozmístění sběrných míst a svozové úlohy spolu úzce souvisí. Ve studii (Huang a Lin, 2015) byl představen dvoufázový postup k pokrytí rezidenčních bloků sítě sběrných nádob a následnému svozu. Cílem přístupu bylo minimalizovat nájezd kilometrů a určit minimální počet provozovaných vozidel. Svoz byl řešen s využitím *Ant Colony Optimization* (ACO). Další kombinaci dvou na sebe navazujících úloh představili v (Hemmelmayr et al., 2014), kde bylo řešeno rozmístění sběrných míst, jejich velikost a počet a následný svoz. Ten byl řešen heuristicky pomocí VNS, přičemž pro rozmístění bylo využito MILP, které bylo řešeno exaktními algoritmy. Představený přístup ukázal pozitivní

výsledky vzhledem k integraci úloh. FS byl dále řešen v návaznosti na produkci emisí. Pro řešení tohoto problému byla v (Koç et al., 2014) představena hybridní evoluční metaheuristika. Byla zde provedena analýza využití kapacity vozidel v porovnání se spotřebou a produkcí emisí, dále pak veškerých nákladů spojených s provozem vozidla (pořízení, pohonné hmoty, údržba, personál). Jako výsledek zde bylo uvedeno kvantifikování výhod využití heterogenního vozového parku. Tyto výsledky pak motivovaly při vývoji a definici nových úloh s ohledem na reálné požadavky. Vícekriteriální úlohu pro svoz odpadu pro oblast ve Španělsku představili v (López-Sánchez et al., 2018). Byl zde minimalizován počet vozidel a zároveň celkové náklady. Pro řešení byl využit *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* v kombinaci s *Variable Neighborhood Descent*, přičemž testování proběhlo na reálné instanci.

2.3 Síťové a alokační úlohy

Z globálnějšího pohledu, kdy se řeší celý dodavatelský řetězec na úrovni krajů či větších územních celků, se využívají úlohy typu *Network Flow* (NF). NF úlohy se zabývají především nabídkou a poptávkou v jednotlivých uzlech sítě, kde je cílem vytvořit bilanci při minimalizaci toků (v závislosti na ceně či jiném parametru). Výsledkem tohoto typu úloh v návaznosti na OH je makroskopický pohled na určení kapacit u zpracovatelských nebo úpravných zařízení. Jejich řešitelnost je obecně snadnější v porovnání se svozovými úlohami a závisí převážně na počtu celočíselných proměnných (povětšinou lze řešit exaktními algoritmy).

Optimální rozmístění ZEVO je uvedeno v práci (Šomplák et al., 2014). Autoři zde svůj přístup nazvali NERUDA, přičemž na základě technických a technologických podmínek určovali ekonomicky udržitelnou cenu na bráně ZEVO na území ČR, kde bylo cílem minimalizovat celkové náklady pro municipality. Zároveň zde bylo využito simulací Monte Carlo pro popsání neurčitosti vstupních parametrů na základě reálných dat. Vyhodnocení rizik spojených s investicí do ZEVO bylo zkoumáno v navazujícím článku (Ferdan et al., 2015). Bylo zde provedeno modelování konkurence schopnosti navrhnutých projektů pomocí stochastického přístupu v síťové úloze. Dostupnost odpadu byla vyhodnocena jako jeden z klíčových a tudíž rizikových faktorů ovlivňujících optimální místo pro výstavbu nových zpracovatelských kapacit. Dalším krokem při vyhodnocení bylo uvažování nového kritéria v podobě produkce skleníkových plynů (Ferdan et al., 2017), na který navázalo detailnější rozpracování v (Ferdan et al., 2018). Výpočet celkové bilance každého uvažovaného zařízení byl proveden na základě produkce vlastních emisí a úspory díky integraci do existující výrobní soustavy (nahrazení fosilních paliv). Tato závislost se ukázala jako velice důležitá, jelikož v každé lokalitě se jednalo o jinou nahrazovanou technologii. V (Šomplák et al., 2019b) byla dále rozpracována myšlenka toků sítí z pohledu nákladů a emisí pro jednotlivé producenty odpadu. Jelikož je výsledkem NF úloh vícestupňové řešení z důvodu stékání a roztékání odpadu v uzlech, tak se ukázalo, že náklady a emise pro některé producenty mohou být značně variabilní. Představený přístup tuto variabilitu identifikoval.

Pohled na logistiku nebezpečného odpadu představili v (Samanlioglu et al., 2013). Byla zde situována zpracovatelská zařízení na základě vícekriteriální účelové funkce, která zohledňovala celkové náklady, riziko vystavení populace nebezpečným materiálem v průběhu transportu i v lokalitě potenciálního zařízení. Překládací stanice a jejich rozmístění byly analyzovány v (Khan et al., 2018) pomocí GIS optimalizačního přístupu. Zároveň byla doporučena optimální kapacita těchto zařízení.

Podmínky v OH se mění i v průběhu roku, ať už se jedná o produkci jednotlivých složek odpadu nebo cenu druhotných materiálů. Celý řetězec systému OH od producenta až po produkt (teplo, elektřina, materiál, palivo atd.) byl představen v celočíselném nelineárním modelu (Santibañez-Aguilar et al., 2017), kde byly uvažovány potenciální lokality a kapacity pro realizaci různých zařízení včetně jejich ekonomiky. Vzhledem k složitosti modelu bylo přistoupeno k postupnému přidávání omezení, přičemž problém byl vždy vyřešen a jeho výstup sloužil jako vstup do dalšího kroku. Účelová funkce zde byla vícekritériální, a to maximalizace ročního zisku a maximalizace zpracovaného odpadu. Tato dvě kritéria však jdou proti sobě, a tak byla sestavena Paretova křivka popisující vzájemný vliv. Model byl testován pro reálná data v Mexiku. Výsledkem výpočtů je stabilizování úrovně naskladněného odpadu, vytipování míst pro realizaci výstavby zpracovatelského zařízení a identifikování množství odpadu pro skládkování. Nevýhodou a slabým místem představeného přístupu je vysoká výpočtová náročnost, která je způsobena enormním množstvím binárních proměnných.

2.4 Systémy sběru odpadu

Různé systémy sběru odpadu mají vliv jak na ekonomiku, tak i na míru separace a s tím spojené využití potenciálu materiálů v odpadu. V (Mwanza et al., 2018) byla představena rešerše pro porovnání čtyř systémů sběru pro rozvíjející se i rozvinuté ekonomiky. Jako nejvhodnější byla identifikována kombinace více systémů, a to v závislosti na parametrech dané lokality. Posouzení z pohledu ekonomiky a životního prostředí je nedílnou součástí při změně nebo implementaci nového systému.

Technická řešení tvoří důležitou složku sběru odpadu. Možnosti v oblasti sběrných nádob, způsobu sběru a komponentů na vozidlech se zabývala studie (Rodrigues et al., 2016a), která kategorizovala jednotlivé prvky celého systému. Představená taxonomie prohloubila doposud popsané technické informace o jednotlivých částech sběru odpadu. Na studii navázala další (Rodrigues et al., 2016b), kde byly všechny složky kvantifikovány a následně vyhodnoceny. Klíčovými prvky systému sběru odpadu jsou:

- **Sběrná nádoba** – pytle, malé až velké kontejnery s nebo bez koleček, zvonové kontejnery, polo-podzemní kontejnery, podzemní kontejnery a další.
- **Vozidlo** – lisovací systém, způsob nakládání, kapacita.
- **Způsob sběru** – manuální, poloautomatický, automatický.
- **Separátně sbírané frakce** – plast, papír, sklo, nápojové kartony, kovy a další.
- **Druh svozu** – *door-to-door* (vlastní sběrná nádoba pro adresní bod), donáškový, sběrné dvory.

Důležitou část v posuzování efektivity celého řetězce nakládání s odpadem hrají historická data. Na jejich základě lze vyhodnotit ukazatele pro jednotlivé operace. V (Jaunich et al. 2016) byl analyzován KO s využitím provozních dat z několika rozdílných měst. Byly zde zkoumány rozdíly ve spotřebě vozidel pro různé systémy sběru, frakce odpadu a typy zástavby. Vyhodnocení bylo provedeno také pro časovou náročnost přejezdů mezi jednotlivými sběrnými místy. Dále byly stanoveny intervaly pro časovou náročnost vyložení vozidla pro rozdílná zařízení, konkrétně pro překládací stanice, recyklační zařízení a pro skládky, které byly identifikovány jakožto časově nejnáročnější. Důležitou roli zde představuje také typ vozidla, resp. pohonné hmoty, které se při provozu spalují. Představená analýza provozních dat umožní mít přesnější vstupy při navazujících ekonomických nebo LCA výpočtech.

Alternativou kontejnerového sběru odpadu je vakuový potrubní systém, který se v současné době testuje na mnoha místech světa (nejvíce v Evropě, Číně, Jihovýchodní Asii a USA). V (Teerioja et al., 2012) bylo provedeno jeho ekonomické porovnání se systémem *door-to-door*. Jeho implementace je však do existující infrastruktury velice složitá. Vhodnější využití tohoto systému je při realizaci nové zástavby, kde se potrubní síť projektuje zároveň s ostatními inženýrskými sítěmi. Jeho realizace je však možná i v oblastech s obtížným přístupem. V článku (Hidalgo et al. 2018) byla posuzována implementace tohoto systému v Barceloně a Leónu (Španělsko), dále pak na ostrově Naxos Chora (Řecko). Vyhodnocení systému z hlediska jeho investiční a provozní nákladovosti zde bylo porovnáváno s úsporou emisí oproti běžnému automobilovému sběru.

Statistický přístup pro posouzení efektivity schémat sběru odpadu byl využit v (Ferreira et al., 2017). Byla zde analyzována data z Portugalského města pro různý druh svozu (*door-to-door* a donáškový) pro sběrné nádoby na separátně sbírané komodity. *Door-to-door* byl vyhodnocen jako efektivnější vzhledem k potřebnému času obsluhy na tunu odpadu.

V (Lavee a Nardiya, 2013) vyhodnocovali celkové náklady na přechod k systému separace u zdroje produkce pro municipality v Izraeli. Byl zde využit regresní model v závislosti na parametrech poskytnutých v dotazníku. Výsledky pak sloužily jako podpora pro stát při rozhodování o výši dotací a grantů pro jednotlivé subjekty.

V zahraničí se v poslední době začíná osvědčovat moderní systém placení na základě vyprodukovaného množství odpadu, tzv. *Pay-As-You-Throw* (PAYT). Tento systém může motivovat obyvatelstvo ke snížení produkce SKO a tak ke zvýšení míry separace. Detailnější rozbor klíčových prvků v systému sběru se zabývala bakalářská práce (Petrasová, 2018).

2.5 Vstupní data, účelová funkce a řešitelnost modelu

Úlohy matematického programování jsou velice citlivé na vstupní data. Jejich přesnost se odráží v nalezených řešeních. Dokonce ani data z reálného provozu nemusí zajistit dokonalé namodelování situace. U každého vstupního parametru je nutné se zamyslet nad jeho dostupností, variabilitou, a hlavně jestli je pro daný problém klíčový. V OH se neurčitosti mohou vyskytovat v různých podobách:

- produkce odpadu (z globálního pohledu na úrovni obce nebo lokálního v konkrétní sběrné nádobě),
- přepravní náklady (spotřeba vozidla),
- přepravní časy (ovlivněny aktuální dopravní situací),
- čas výsypu sběrné nádoby (závisí také na lokálních podmínkách či obsluze),
- variabilní poptávka po teple (v případě tokových úloh ovlivňuje výslednou ekonomiku ZEVO),
- měnící se legislativa.

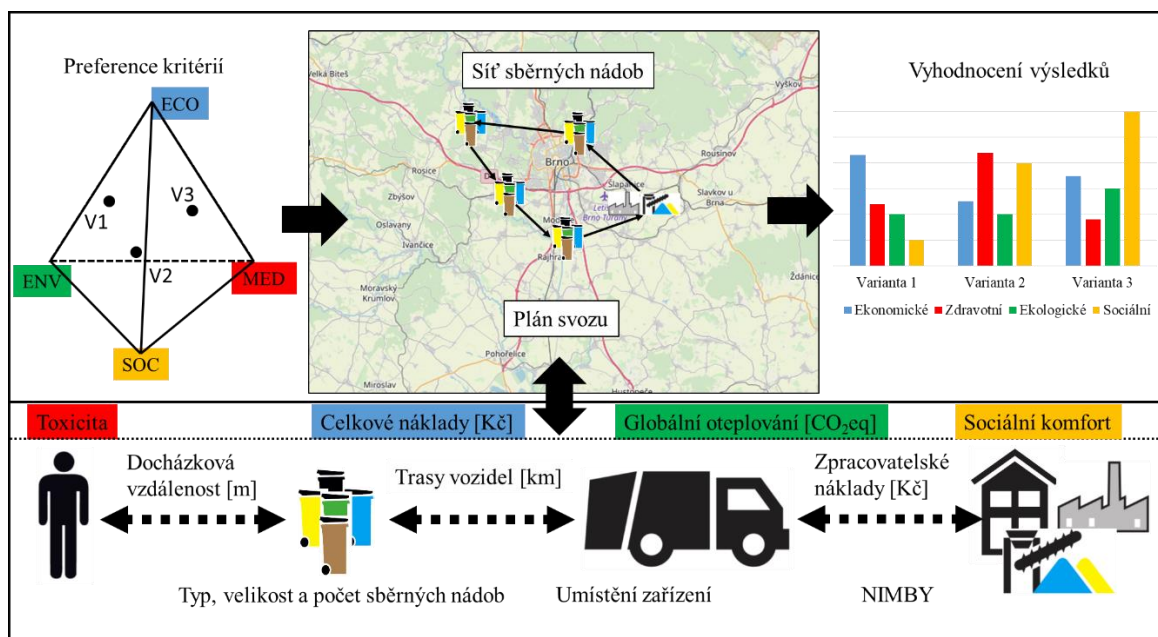
Z těchto důvodů může být každý problém formulovaný jako stochastická úloha. Řešení těchto úloh však značně komplikuje narůstající časová náročnost, což obzvlášť v NP-těžkých úlohách (nedeterministicky polynomiální třída složitosti) úplně znemožňuje exaktní přístup k řešení problému. Stochastických přístupů pro formulaci existuje mnoho. Mezi nejpoužívanější patří *Here-and-Now*, *Wait-and-See*, dvoustupňová optimalizace,

pravděpodobnostní omezení, *Conditional Value at Risk* a mnoho dalších (Birge a Louveaux, 2011).

Nejdůležitější částí modelu je účelová funkce, jelikož její parametry rozhodují o výsledném řešení na základě omezeními definovaném prostoru přípustných řešení. V OH se mohou vyskytovat různá kritéria pro nalezení optima, přičemž se dá konstatovat, že jsou tři hlavní kategorie:

- **Ekonomika a náklady** – minimalizace celkových nákladů, možnost využití ekonomických ukazatelů (vnitřní výnosové procento – IRR (*Internal Rate of Return*), vážený průměr nákladů kapitálu – WACC (*Weighted Average Cost of Capital*)), maximalizace příjmu, čistá současná hodnota – NPV (*Net Present Value*), míra rizika z hlediska scénářů,
 - fixní – do této kategorie spadají investiční a materiálové náklady,
 - pořízení sběrných nádob, nákup vozidel, výstavba zpracovatelského zařízení,
 - variabilní – do této kategorie spadají provozní náklady,
 - svoz odpadu (pohonné hmoty), údržba nádob a vozidel, přeprava odpadu do zařízení, úprava odpadu, mzdy, doprava residuí po zpracování, náklady na zpracování.
- **Environmentální a zdravotní aspekt** – dopad na životní prostředí nebo obyvatelstvo,
 - produkce skleníkových plynů (GHG – *Greenhouse Gases*) nebo jiných polutantů, možnost agregace pomocí indikátoru GWP, HTP apod., využití LCA pro vyhodnocení celého koloběhu,
 - dosažení požadované míry separace/recyklace,
 - snížení produkce odpadu.
- **Sociální aspekt** – vnímání dané problematiky obyvatelstvem,
 - NIMBY (*Not In My Back Yard*) – vyjadřuje odmítavý postoj lidí k nezbytné realizaci stavby či dopravy v blízkosti jejich domova,
 - míra bezpečnosti, zranění,
 - stabilita zaměstnanosti,
 - tvorba pracovních míst,
 - pracovní doba,
 - pohodlnost pro obyvatele – snižování docházkové vzdálenosti ke sběrným místům, resp. zavedení *door-to-door* systému,
 - zdraví.

Možnosti účelové funkce zahrnují i vícekritériální rozhodnutí, přičemž se hledají např. Pareto optimální řešení. Pak už záleží na realizátorovi daného úkolu, pro jaké řešení se rozhodne a jaký poměr hodnot účelových funkcí je akceptovatelný. Tento proces je schematicky znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Schématické znázornění vícekritériálního rozhodování

Překážkou při řešení úloh z OH je výpočtová náročnost. Ta často ovlivňuje úroveň detailu, která může být v modelu uvažována. Vysoká výpočtová náročnost je dána kombinatorickými možnostmi definované úlohy. K zajištění přijatelného času výpočtu se využívá heuristických algoritmů, které jsou často založené buď na exaktních přístupech, nebo jsou inspirovány fungováním přírody. Výčet některých využívaných heuristických algoritmů je v tab. 1. V práci budou dále využity techniky některých z nich. Alternativní možností snížení složitosti problému jsou redukční a dekompoziční techniky, které však často snižují přesnost dosažených výsledků.

Tab. 1 Výčet nejpoužívanějších heuristických přístupů

Algoritmus	Popis
<i>Evolutionary (Genetic)</i>	Obecnější algoritmus využívající evolučních procesů. Tvorba generací v rámci populace pomocí křížení jedinců.
<i>Greedy</i>	Hladový postup využívající lokálních extrémů dle daného kritéria.
<i>Neighbourhood Search</i>	Dvoufázová metaheuristika kombinující lokální prohledávání a následný odklon z lokálního extrému.
<i>Tabu Search</i>	Lokální prohledávání kombinované se zákazem přesunu do již navštívených řešení.
<i>Simulated Annealing</i>	Adaptace termodynamického procesu. Jedná se o pravděpodobnostní techniku hledající ve velkém prostoru přípustných řešení.
<i>Colony and Swarm Optimization (Discrete Artificial Bee Colony, Self-Organising Migrating Algorithm)</i>	Pravděpodobnostní techniky inspirované chováním živočichů. Většinou jsou uchovávány parametry o poloze, rychlosti a paměť dříve navštívených míst v prostoru řešení u každého jedince. Úspěšnější jedinci ovlivňují směřování ostatních jedinců a tím mění směr prohledávání prostoru řešení.
<i>Memetic</i>	Kombinace populačního přístupu s individuálními zlepšovacími procedurami.

2.6 Přínos a mezery v přístupech současného výzkumu

Dizertační práce navazuje na diplomovou práci (Nevrlý, 2016), kde byl představen matematický model popisující základní požadavky na svozovou úlohu z OH. Implementace

algoritmu pro řešení dané úlohy byla provedena v jazyce C++. Z pohledu reálných problémů však představený postup není dostačující, a tak musí být rozšířen o nové funkcionality. K těmto účelům slouží hlavně také návrh technického postupu a algoritmů pro přípravu vstupních dat.

Předchozí kapitola představila směr výzkumu a aktuální poznatky ze světové literatury s vazbou na plánování v OH, potažmo implementaci do národní úrovně ČR. Cílem dizertační práce je identifikovat slabá místa a nedostatky, kterým se doposud vývoj nevěnoval, a některé následně implementovat v rámci koncepčního řešení konkrétních problémů. Tab. 2 sumarizuje vybrané publikace s využitými metodami a mírou detailu pro nalezení potenciálu nových přístupů u svozových úloh.

Tab. 2 Souhrn vybraných světových publikací

	Úloha	Vozový	Více tras	Časová	Periodicita	Omezení	Neurčitost	Účelová funkce	Řešení	Asymetrie	Dynamické	Případová	Oblast	Komodita	Velikost úlohy
<i>Schiffer a Walther, 2017</i>	LRP	O	✓	✓		✓	✓	Náklady	ALNS		✓	✓		-	M
<i>Nowakowski et al., 2018</i>	VRP, FCS	E		✓		✓		Náklady	Gr, TS, SA, BCO			✓	Tokyo, Filadelfie, Varšava	E-w	S
<i>Laureri et al., 2016</i>	VRP	O						Náklady	H				Janov - historické centrum	W	S
<i>Ramos et al., 2018</i>	VRP	O	✓		✓			Zisk	H + EX		✓	✓	Portugalsko	Rec	S
<i>Ramos et al., 2014a</i>	AP, VRP	-	✓					Náklady	E			✓	Portugalsko	Pac.	L
<i>Teixeira et al. 2004</i>	VRP	O	✓		✓			Náklady	H			✓	Portugalsko	Rec	L

	Úloha	Vozový park	Více tras	Časová okna	Periodicita	Omezení času	Neurčitost	Účelová funkce	Řešení	Asymetrie	Dynamické	Případová	Oblast	Komodita	Velikost úlohy
<i>Huang a Lin, 2015</i>	FCS, VRP	O	✓			✓	✓	Vzdál.	ACO	✓		✓	Taiwan	Rez	M
<i>Hemmelmayr et al., 2013</i>	VRP	O	✓		✓			Náklady	VNS					Rec	S-M
<i>Cattaruzza et al., 2014</i>	VRP	O	✓					Čas	Memetic						S-L
<i>Hemmelmayr et al., 2014</i>	AP, VRP	O						Náklady	VNS						-
<i>Tirkolaee et al., 2018</i>	ARP	O			✓	✓	✓	Náklady	SA			✓		Rez	S-M

Pozn.: O=homogenní; E=heterogenní; AP=alokační problém; H=heuristika; EX=exaktní přístup; E-w=elektroodpad; W=mokrý odpad; Rez=reziduální odpad; Rec=recyklovatelný odpad; S,M,L=velikosti (small, medium, large)

Na základě rešerše byly identifikovány výzvy pro vývoj nových přístupů a definování úloh s omezeními a podmínkami, které mají uplatnění v reálné praxi:

- Velká část prezentovaných modelů a algoritmů měla předpoklad splnění tzv. **trojúhelníkové nerovnosti**³. Tato vlastnost však v reálné síti nemusí být splněna.
- V rámci denního svozu odpadu daným vozidlem může vzniknout potřeba **změnit sváženou komoditu** (typ odpadu) mezi jednotlivými trasami. V praxi to znamená, že po výsypu jedné frakce odpadu může auto navázat sběrem frakce jiné. V závislosti na typu odpadu pak přibývá nutnost umytí vozidla, což s sebou přináší časové zdržení a vícenáklady. Aktuálně se nejčastěji využívají separátní vozidla svážející pouze SKO s bioodpadem, na ostatní typy odpadu jsou pak vozidla jiná.
- Z hlediska infrastruktury je nutné zajistit, aby po navštívení daného uzlu nebylo možné pokračovat ve svozu po stejné cestě jako byla příjezdová (**zamezení otáčení uprostřed ulice** nebo v křižovatce).
- Využití monitoringu reálných svozů pro **inicializaci řešení** pro heuristické algoritmy.

³ Trojúhelníková nerovnost v tomto kontextu znamená, že součet délek dvou hran propojující dva body není nikdy menší než délka hrany přímé.

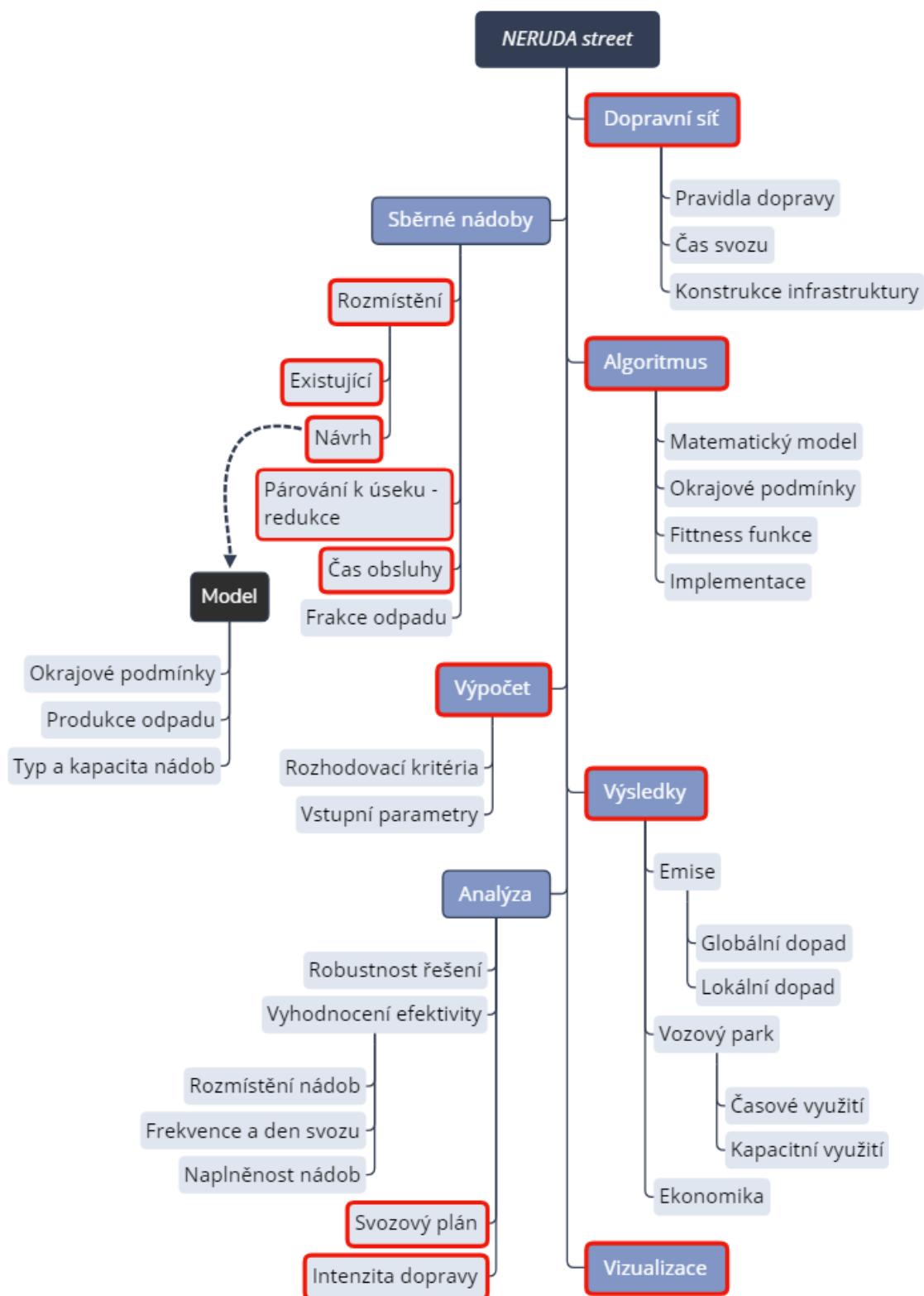
- **Čas obsluhy** jednotlivých sběrných míst je závislý na konkrétní lokalitě a typu sběrné nádoby. Dále pak v případě více nádob ve stejném bodě nemusí být závislost na počtu lineární.
- Zohlednění **naplněnosti kontejneru** u každé sběrné nádoby na základě dostupných historických dat. V případě senzorů snímající naplněnost lze vytvořit **prognostický model** na základě analýzy časové řady.
- Většina úloh neuvažuje vzdálenost/čas na **vrácení do depa** po posledním navštívení zpracovatelského zařízení, pokud není totožné s depem. Dále pak může být efektivní v rámci celého periodického svozu povolit vrácení do depa s **nějakým nákladem**, s kterým by se pokračovalo ve svozu další den.
- Některé aplikace svozu mohou vyžadovat **pauzu mezi jednotlivými trasami**, případně i v průběhu svozové trasy.
- Vzhledem k současnému trendu zvyšování míry separace se přidávají do sítě nové sběrné nádoby. Úloha pro **optimální doplnění sítě** a následné **zpracování sběrných nádob do plánu** (minimální úprava současného stavu) svozu také nebyla definována.
- V případě uzavřených ulic z důvodu rekonstrukce dopravní infrastruktury pak bývají **sběrné nádoby naakumulovány na jednom místě** a jejich optimální zařazení v rámci svozových plánů může být odlišné.
- V průběhu roku se v některých městech může **měnit frekvence svozu** sběrných nádob (např. častější svoz bioodpadu v letních měsících a zároveň méně častý svoz SKO)
- Z důvodu nemožnosti svozu (nepřístupnost ke sběrnému místu, nevytažený kontejner apod.) některých sběrných nádob vzniká požadavek na **náhradní svoz** v následujícím dni.
- Efektivní **redukce modelu a sítě** s minimálním snížením přesnosti výsledků – návrh agregace sběrných míst na základě technických parametrů byla zkoumána jen v malé míře.

Často chybějící částí výzkumných článků je verifikace výsledků pomocí existujících provozů. Získané výsledky by také mohly být analyzovány v rozsáhlém post-processingu, který může zahrnovat následující aspekty:

- **Robustnost řešení**
 - stochastické znáhodnění času – dopravní omezení, zácpy, poruchy;
 - stochastická produkce – změna naplněnosti sběrných nádob.
- **Vyhodnocení efektivity systému sběru**
 - vhodnost frekvence a dne svozu sběrných nádob;
 - efektivita rozmístění – místo, velikost, typ a počet nádob.
- **Doprava**
 - zátěž silnic různými typy vozidel – intenzita dopravy;
 - produkce emisí v daných lokalitách a vliv na obyvatelstvo;
 - vytížení vozového parku.
- **Analýza ekonomiky**
 - mzdy;
 - údržba;
 - spotřeba pohonných hmot;
 - investice – vozidla, kontejnery, technologie.
- **Lokalita zařízení**
 - typ – úpravné nebo zpracovatelské;

- udržitelnost – odpad, ekonomika;
- názory veřejného mínění.

Důležitým krokem je rozřazení reálných úloh do kategorií, kde je vhodné využít vyšší úroveň detailu dostupných dat. Z pohledu řešitelnosti úlohy nelze kombinovat všechny okrajové podmínky zároveň. V této dizertační práci bude rozšířena diplomová práce (Nevrlý, 2016) o některé z výše uvedených omezení a reálných překážek, důraz bude kladen na dílčí přístupy a algoritmy ke zpracování vstupních dat. Algoritmy budou implementovány s ohledem na reálnou úlohu svozu odpadu na lokální úrovni s přihlédnutím k požadavkům z praxe. Příprava vstupních dat pomocí navržených algoritmů tak bude představovat klíčovou část práce. Při zpracování dat vzniká potřeba pro implementaci dílčích postupů za účelem přiblížení se realitě analyzovaného problému. V rámci přípravy dat se bude pracovat s programy a jazyky jako MS Excel a VBA (*Visual Basic for Application*), SQL, C++, či PYTHON. Představený model by měl uvažovat některé faktory zmíněné v předchozí části tak, aby zohledňoval celkovou situaci v OH podle konkrétního reálného problému. Další část se bude věnovat návrhu řešení a implementaci ve zvoleném programovacím prostředí (vlastní vývoj v nějakém programovacím jazyce nebo existující modelovací prostředí GAMS – *General Algebraic Modeling System*). Podle možností budou dílčí algoritmy navrženy, implementovány a popsány v pseudokódech. Schématické znázornění všech částí celého konceptu plánování a řešení svozových problémů je na obr. 2 (pracovní název celého vyvíjeného systému je NERUDA Street). S ohledem na rozsah schématu bude v dizertační práci věnována rozdílná pozornost dílčím částem. Oblasti, které budou řešeny v této práci nebo v rámci publikací jsou označeny červeně. Stěžejní část práce se bude zabývat návrhem dopravní sítě, která zahrnuje pravidla dopravy a konstrukci infrastruktury. Další část bude věnována sběrným nádobám, přičemž bude diskutováno jejich rozmístění, časy potřebné pro obsluhu. Pro zvolený přístup bude navrhnout způsob párování sběrných nádob s dopravní sítí, který redukuje velikost výsledné úlohy. S ohledem na potřeby bude zkoumán přístup pro rozmístění nových sběrných nádob. Jednotlivé aplikační možnosti představeného přístupu budou komentovány v krátkých případových studiích, které budou postaveny na reálných datech. Pro posuzování některých výstupů bude využito grafické zobrazení výsledků, které bude zpracováno v aplikaci *Waste Transportation Manager* (WTM), která je autorem a jeho kolegy simultánně vyvíjena na Ústavu procesního inženýrství (ÚPI).



Obr. 2 Schématické znázornění pracovních aktivit

3 PŘÍPRAVA A PŘÍSTUPY KE ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT

Vstupní data hrají klíčovou roli v každém výpočtu a následném vyhodnocení závěrů a doporučení. Obzvláště při plánování svozu je přesnost a věrohodnost parametrů vstupujících do výpočtů velice důležitá. Přístup k jejich zpracování se zároveň velkou měrou odráží ve výsledcích. Metody a přístup ke zpracování dat budou demonstrovány na OH v ČR.

3.1 Produkce odpadu

Podle platné legislativy ČR (zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech) jsou odpady rozděleny do různých kategorií podle původu vzniku. K rozlišení jednotlivých druhů odpadu pak slouží šesticiferný kód, který lze nalézt v katalogu odpadů (vyhláška č. 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů). Zájmovou oblastí pro využití výpočtového nástroje jsou odpady vznikající na území obce. Ty jsou vedeny ve skupině komunální (první dvojčíslí: 20 a první dvě dvojčíslí: 15 01). V současné době se KO rozděluje do dalších tří základních kategorií (druhé dvojčíslí: 01–03) - složky z odděleného sběru, odpady ze zahrad a parků (včetně hřbitovního odpadu) a ostatní KO. Další skupinou předmětných odpadů jsou Odpadní obaly; absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené (skupina s dvojčíslím 15). Výčet předmětných odpadů a jejich katalogových čísel je v tab. 3.

Tab. 3 Katalogová čísla vybraných odpadů

Odpad	Katalogová čísla
Papír a lepenka	20 01 01, 15 01 01
Sklo	20 01 02, 15 01 07
Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven	20 01 08
Oděvy	20 01 10
Textilní materiály	20 01 11
Plast	20 01 39, 15 01 02
Kovy	20 01 40, 15 01 04
Biologicky rozložitelný odpad	20 02 01
Směsný komunální odpad	20 03 01
Objemný odpad	20 03 07

Zmíněné kategorie odpadů jsou sbírány odděleně, přičemž každá z nich má jiný logistický řetězec závislý na materiálu, množství a způsobu následného zpracování. Kovy a objemný odpad jsou separovány převážně na sběrných dvorech a sběrných střediscích odpadu, kde je možnost sběru i jiných odpadů.

Vzhledem k měnící se materiálové struktuře obalových materiálů a chování spotřebitelů se složení KO a jeho jednotlivých kategorií v čase mění. Složení odpadu je závislé na lokalitě, zástavbě, socio-ekonomických ukazatelích a dalších faktorech. Stejně tak se v průběhu času mění celková produkce odpadu. Budoucí, stejně jako současnou produkci a složení odpadu je potřeba analyzovat, jelikož hraje významnou roli při rozhodování a plánování v OH.

V ČR existuje několik orgánů zabývajících se evidencí dat o produkci odpadu. Mezi hlavní patří MŽP, které si nechává společností CENIA spravovat databázi ISOH. Druhým hlavním orgánem, který zpracovává a zaznamenává data, je Český statistický úřad, dále pak samosprávy krajů, krajské úřady, obce a neposlední řadě také komerční sféra. V ukládaných

datech se často nacházejí chyby vznikající na různých úrovních a z různých důvodů (administrativa, předávání mezi orgány, při měření apod.). Chybná evidence dat přispěla k vývoji unikátního výpočtového nástroje pro vyrovnání dat „Justine“ (www.upi.fme.vutbr.cz/justine), který je v posledních letech rozvíjen na pracovišti ÚPI, VUT v Brně (Nevrlý et al., 2016, Smejkalová et al. 2017, Pavlas et al. 2017, Šomplák et al. 2017, Smejkalová et al., 2018, Šomplák et al., 2019b). Výhled produkce jednotlivých odpadů je v logistických úlohách významný především z důvodu rozvržení kapacit zpracovatelských zařízení (globální úroveň) a časových možností vozových parků podle specifikací a požadavků daného odpadu (lokální úroveň). Detailnější pohled je rozebrán v následující sekci.

U svozových úloh je klíčovou informací množství odpadu v každé nádobě, jelikož se podle něj plánuje využití kapacity vozidla. Údaje o množství nebo o naplněnosti sběrných nádob však nebývají dostupné, a tak se často uvažuje spíše s ofenzivní variantou, která předpokládá plné využití kontejnerů. Budoucí trend směřuje k osazení svozových vozů vážicími systémy, které při každém výsypu zaznamenávají množství odpadu v konkrétních sběrných nádobách. Na základě těchto dat je pak možné odhadovat budoucí naplněnost a přizpůsobit tomu jednotlivé svozové trasy, velikost a počet nádob.

V případě dostupnosti historických dat v podobě vážících lístků, a současné evidenci obslužených míst je pak možné poměrově rozpočítat odhad množství odpadu na jednotlivé nádoby. Pro více takových měření pak dostáváme soubor několika hodnot, které popisují variabilitu mezi různými svozy. Zde by bylo dále možné zavést korekční koeficienty, které dávají různou váhu pro odlišné objemy sběrných nádob (v objemnějších nádobách se předpokládá větší sypaná hmotnost odpadu). Výpočet těchto koeficientů by mohl vycházet např. z údajů z prováděných rozborů odpadu v nějakém časovém období a lokalitě.

3.2 Sběrné nádoby

Množství a velikost sběrných nádob významně ovlivňuje plán svozu. Sběrné nádoby se mohou lišit pro jednotlivé frakce separovaně svážených odpadů, což se projevuje v rozmanitosti technických řešení na vozidlech vozového parku. Nejčtenější jsou nádoby o objemu 120 L a 240 L, které se vyskytují převážně v zástavbě rodinných a bytových domů (větší počet nádob na adresní bod z důvodu manipulace a potřebného místa). Nádoby o objemu 1100 L jsou převážně v sídlištní zástavbě.

Méně rozšířené jsou polo-podzemní či podzemní kontejnery o objemech 3–5 m³, které vyžadují specificky uzpůsobená vozidla pro jejich výsyp (hydraulické rameno apod.). Nejčastěji jsou situovány v historických centrech, kde není prostor pro volně stojící nádoby, zároveň se zde využívají z důvodu zachování estetického vzhledu lokality. Vzhledem k jejich velkému objemu nevyžadují vysokou frekvenci výsypu, nicméně pořizovací náklady na vybudování jednoho hnízda (např. 4 podzemní kontejnery, 1 systém PAYT pro SKO) mohou být až 1 mil. Kč (Petrasová, 2018). Například v Brně se v roce 2019 nacházelo celkem 18 takových stanovišť.

3.2.1 Existující rozmístění

Když jsou sběrné nádoby již rozmístěny v rámci infrastruktury, tak příprava vstupních dat záleží na dostupnosti jednotlivých údajů. V případě, kdy probíhá monitoring a sběr dat na úrovni jednotlivých sběrných tras, je možné data využít pro stanovení průměrných

hodnot. Na základě rozpočítání celkové hmotnosti odpadu získané z vážení vozidla se určí množství odpadu pro jednotlivé sběrné nádoby. V některých případech bývají dostupné i údaje o naplněnosti konkrétních sběrných nádob (procentuální odhad pracovníka, popř. data z čipu). Ke každé sběrné nádobě jsou dále potřebné údaje o typu a velikosti, frekvenci svozu, adrese, GPS souřadnicích a typu odpadu. Je-li množství odpadu známo pouze na úrovni obce, pak lze hodnoty stanovit na základě rozpočítání produkce (aktuální, popř. prognózované pro budoucí stav) s využitím dat o zástavbě a dalších socio-ekonomických parametrů (Rosecký, 2018).

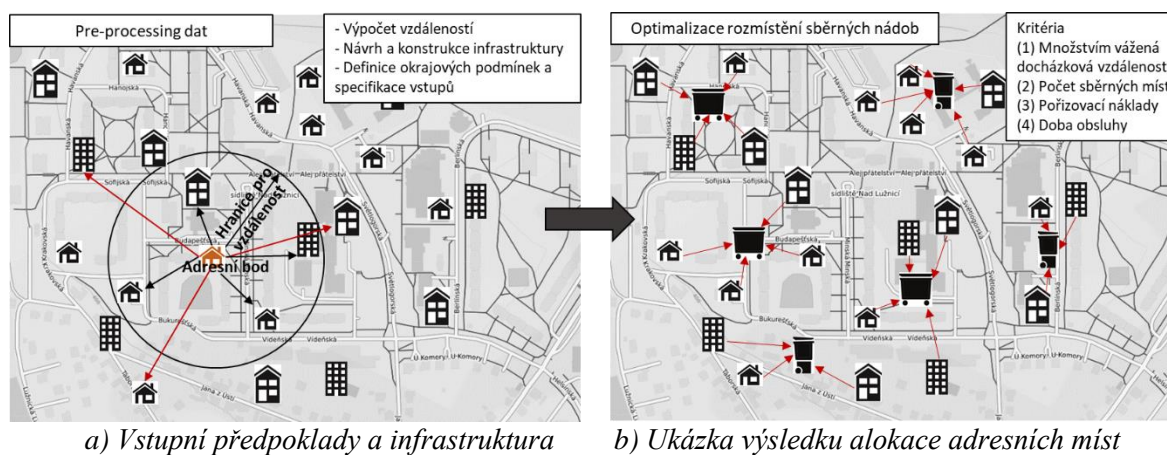
3.2.2 Návrh rozmístění

Při návrhu rozmístění sběrných nádob (úprava stávajícího rozmístění, nově svážená frakce, jiný systému sběru/typ kontejneru) hrají některé parametry klíčovou roli. Významným ukazatelem pro vyhodnocení místa je zejména docházková vzdálenost. Tu je možné spočítat, pokud jsou dostupné informace o počtu obyvatel na adresní bod. Průměrná docházková vzdálenost k nejbližší sběrné nádobě tříděného odpadu se každým rokem snižuje. Dosavadní trend zahušťování sítě vychází z předpokladu, že menší docházková vzdálenost má vliv na ochotu obyvatel třídit (předpokládá se nepřímá úměrná korelace docházkové vzdálenosti s množstvím vyseparovaného odpadu) (Leeabai et al., 2019). Cílem úlohy o rozmístění sběrných nádob pak může být maximalizace míry separace (snižování docházkové vzdálenosti) či minimalizace nákladů (počtu sběrných nádob) při zohlednění požadované naplněnosti. Pro návrh sběrné infrastruktury v konkrétní lokalitě je tedy nutné znát GPS souřadnice adresních bodů a korespondující počet obyvatel, typ zástavby a případně další faktory, které ovlivňují produkci a složení odpadu, ale také míru separace. Ty je možné zjistit na základě provedené korelační analýzy pro lokalitu, kde jsou dostupná historická data a potenciální faktory. Přístup pro získání vhodného rozmístění je možné formulovat pomocí smíšeného celočíselného programování, kde pak bude možné na základě požadovaných kritérií simulovat potenciální situace v OH.

Dvoukriteriální přístup pro rozmístění sběrných nádob byl představen v článku (Nevrlý et al., 2019a), kde byla detailněji analyzována naplněnost jednotlivých sběrných míst a také celkové využití navržené kapacity. Tyto dva parametry sloužily jako vstupní data, přičemž byly analyzovány výstupy ve formě docházkové vzdálenosti a celkového počtu sběrných míst. Na základě výsledků pak byly stanoveny vhodné vstupní hodnoty pro individuální a celkovou naplněnost sběrných nádob.

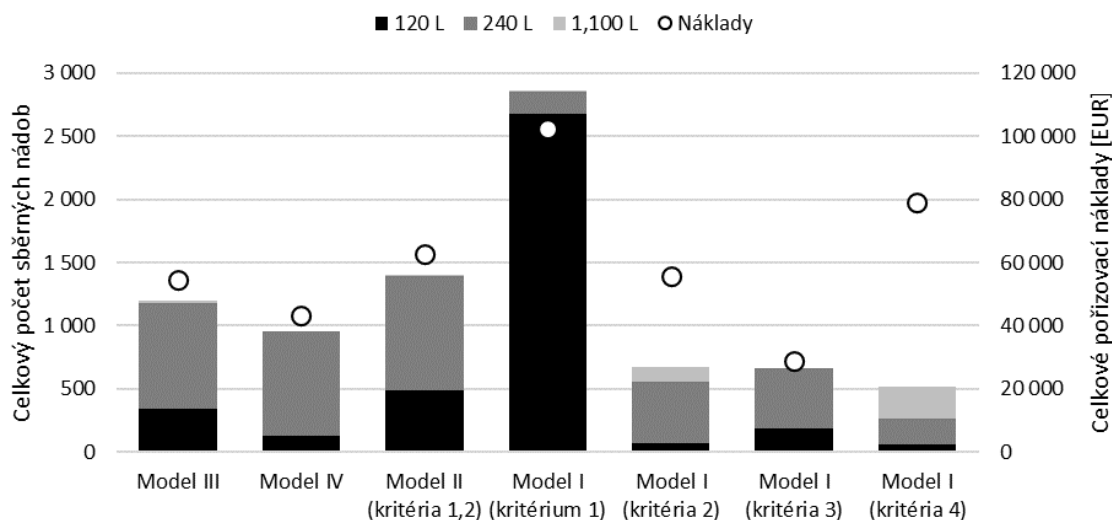
Na tento článek navazovala detailnější studie (Nevrlý et al., 2021), která rozšířila matematický model o několik dalších kritérií, a to pořizovací náklady na sběrné nádoby a doba obsluhy při svozu odpadu. Dále byla zavedena možnost volby frekvence svozu. Úloha matematického programování je zde formulována několika způsoby pro jedno-kriteriální i vícekriteriální optimalizaci: Model I – minimalizace zvoleného kritéria; Model II – minimalizace vážené sumy dvou kritérií (měnící se váha v jednotlivých iteracích výpočtu); Model III – minimalizace relativní odchylky (jedna hodnota) od optimálních hodnot jedno-kriteriálních úloh; Model IV – minimalizace sumy relativních odchylek. Konstrukce infrastruktury zahrnuje definování vzdáleností (uvažovaná vzdušná vzdálenost) mezi adresními body a potenciálními sběrnými místy (každý adresní bod je na začátku uvažován jako potenciální místo pro sběrné nádoby), odhad produkce na obyvatele a propočet na příslušné adresní místo a další vstupy související s frekvencemi svozu, náklady apod. Sestavená síť je dále z výpočetních důvodů zmenšována, a to omezením na maximální množství potenciálních sběrných míst pro každý adresní bod a také zvolenou limitní

vzdáleností pro každý adresní bod. Tímto postupem se významně zjednoduší celý graf (počet hran popř. uzlů). Tento postup je graficky znázorněn v první části obr. 3, přičemž druhá část zobrazuje schématický výsledek po optimalizaci.



Obr. 3 Postup pro návrh rozmístění sběrných nádob

Souhrn výsledků představeného přístupu pro město Tábor, které má okolo 35 000 obyvatel, je pro různou kombinaci kritérií a účelových funkcí na obr. 4. Číselné značení jednotlivých kritérií odpovídá tomu z obr. 3. Graf srovnává zastoupení jednotlivých typů sběrných nádob, jejich celkový počet a odpovídající pořizovací náklady. Z výsledků je patrné, že Model III i IV dokáže nalézt kompromis, který neupřednostňuje žádný z analyzovaných parametrů. Detailnější komentář k více-kritériální optimalizaci sběrných nádob, nastavení vstupních parametrů a další podrobnosti jsou v článku (Nevrlý et al., 2021).



Obr. 4 Výsledky optimalizace sběrných nádob pro různá kritéria

Pozn. Kritéria: 1 – množstvím vážená docházková vzdálenost; 2 – počet sběrných míst; 3 – Pořizovací náklady; 4 – doba obsluhy

Pro nově zaváděné separátně sbírané frakce odpadu je pak možné využít představený přístup pro rozmístění nových sběrných nádob. Lze si nastavit preference týkající se maximálních nákladů, typů sběrných nádob, maximální nebo požadované docházkové vzdálenosti či počtu sběrných nádob nebo míst. Na základě těchto vstupů pak bude navržena infrastruktura sběrných nádob, která slouží jako vstupní údaj do svozových úloh. Po výpočtu

je pak možné odhadnout celkovou ekonomickou zátěž svozu nové frakce odpadu pro obec (dopad na její rozpočet) či analyzovanou oblast.

3.3 Vozový park

Dalším důležitým vstupem je existující (současně provozovaný) a potenciální (vhodný k optimálnímu systému sběru) vozový park. Každé vozidlo je ohodnoceno parametry týkající se investičních, fixních a variabilních provozních nákladů, dále pak kapacitou, technologií lisu a typu obsluhovatelných kontejnerů. S tím souvisí i nutnost přepočítávat kapacitu dle sytné hmotnosti sbíraného odpadu. Běžně dostupné kapacity KUKA vozů se pohybují v rozmezí od 1,2 do 12 t. Detailnější údaje pro různé typy vozidel jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Ukázka parametrů KUKA vozů a detail pro plastový odpad

	Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3
Největší tech. povolená hmotnost [kg]	26 000	18 000	16 000
Provozní hmotnost [kg]	15 360	13 180	10 460
Objem nástavby [m³]	20,5	15	12
Sypná hmotnost plasty [kg/m³]*	220	200	250
Maximální množství plastového odpadu [kg]*	4500	3000	3000

* hodnoty odhadnuté z monitoringu svozu

Dle velikosti vozidla pak vznikají další omezení na základě dopravní infrastruktury (nemožnost průjezdu, malý prostor pro manipulaci apod.). Náklady spojené s dobou, po kterou je možné jednotlivá vozidla využívat se odvíjí od počtu zaměstnanců. Tato denní provozní doba může být stanovena jako flexibilní (uvažování vícenákladů) nebo pevná (běžná pracovní doba 8 hodin). Běžně se udává, že jedno svozové vozidlo je schopné obsluhovat cca 10 tisíc obyvatel, při větším počtu je pak nutné zakoupit vozidlo další. Umístění vozovny v rámci svozové oblasti pak hraje další roli v celkových nákladech. Optimální umístění vozovny může být předmětem samotné optimalizační úlohy, avšak běžně je využívána spíše metoda s již existujícími svozovými plány a hledání vhodného místa s ohledem na ně.

V případě modifikace již existujících svozových plánů může hrát velkou roli přiřazení vozidla k jednotlivým trasám. Pro časově náročnější trasy, které nedokážou využít potenciálu kapacity vozidla, lze významně uspořit na pohonných hmotách v důsledku nižší spotřeby volbou menšího a lehčího vozidla. U menších vozidel se uvažují menší náklady za ujetý kilometr. V optimalizační úloze tak může být minimalizována cena svozu (odlišná pro jednotlivá vozidla) namísto celkového nájezdu kilometrů.

Jsou-li dostupná data z historických svozů, kde byly zaznamenávány také vážící lístky, je možné odhadovat maximální naplněnost pro dané vozidlo, a také pro svážený typ odpadu. Pro vyšší robustnost tohoto vstupního parametru lze uvažovat např. 95. percentil z dostupných záznamů. Tento přístup také zabrání nesprávné interpretaci chybných dat.

3.4 Infrastruktura

Infrastruktura je klíčovým vstupem pro řešení jakékoliv logistické úlohy. Její přesnost a úroveň detailu velikou měrou přispívá ke kvalitě získaných výsledků. Je nutné znát topologii sítě a její vzdálenosti. K popisu sítě se využívá graf, který je definován množinou uzlů, množinou uspořádaných dvojic (hrany) a ohodnocením hran. Vzdálenosti mezi uzly mohou být reprezentovány maticí o rozměru $n \times n$, kde n je mohutnost množiny uzlů. V matici je jednoznačně definováno, které křižovatky jsou spojeny silnicí. Každá křižovatka dané sítě má vlastní jedinečný identifikátor, k němuž jsou přiřazeny další parametry jako GPS souřadnice (*latitude*, *longitude*), existence semaforu a další. Pro práci se vzdálenostmi se také často využívá úplná matice vzdáleností, ve které jsou dopočítány vzdálenosti mezi všemi uzly sítě pomocí algoritmu na hledání nejkratší cesty (Floyd-Warshall, 1962, Dijkstra, 1959).

3.4.1 Vzdálenosti

Pro přípravu infrastruktury se využívá veřejně dostupná databáze OpenStreetMap (OSM, openstreetmaps.org), kde lze na základě vybraných kritérií zvolit úroveň detailu silniční sítě. Křižovatky (uzly sítě) jsou identifikovány tam, kde se ulice kříží, přičemž musí mít jeden společný bod (ID) v rámci zvolené vrstvy zdrojových dat. Na základě dostupného grafu, který popisuje infrastrukturu, se vytváří matice vzdáleností, která vstupuje do výpočtu. Matice se však liší oproti běžným přístupům tím, že udává vzdálenost mezi segmenty infrastruktury, tj. vzdálenost od konce jedné hrany na začátek druhé. Algoritmus pro vytvoření této matice je popsán v pseudokódu na obr. 5.

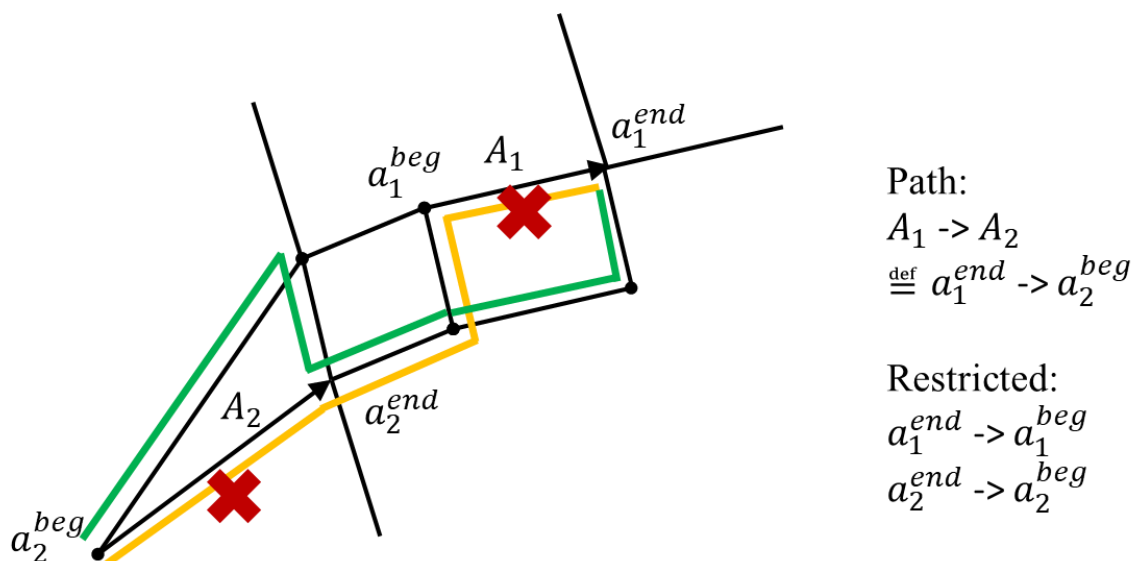
```

1: penal = False
2: for all Arc1 in Arcs do
3:   for all Arc2 in Arcs do
4:     Create set of RestrictedArcs
5:     Graph→penalize restricted arcs
6:     (path, Distance)←Solve bidirectional Dijkstra (Graph, Arc1[end], Arc2[start])
7:     for all resArc in RestrictedArcs do
8:       if resArc in Path then
9:         Distance = Distance – Penalization + OriginalLength[resArc]
10:        penal = True
11:       end if
12:       Graph→Original evaluation
13:     end for
14:     if penal = True then
15:       Distance += penalDistance
16:     end if
17:     DistanceMatrix[Arc1][Arc2] = Distance
18:   end for
19: end for

```

Obr. 5 Algoritmus sestavení matice vzdáleností segmentů

Penalizace je zde využita pro znemožnění otáčení v křižovatkách a návratu po stejné cestě, jak vozidlo přijelo. Tato situace je ilustrována na obr. 6. V případě slepých ulic nebo oblastí, kde se tomuto nelze vyhnout je penalizace zrušena a zavedena nová penalizační vzdálenost odpovídající náročnosti otočení vozidla.



Obr. 6 Infrastruktura a trasy s a bez penalizace

Obr. 6 znázorňuje dvě potenciální trasy z hrany A_1 na hranu A_2 . Ta z definice úlohy koresponduje s trasou z bodu a_1^{end} do bodu a_2^{beg} . Žlutá trasa využívá segmenty ulic tak, aby byla co nejkratší. Zelená trasa je hledána se stejnou podmínkou, a navíc ještě s penalizovanými segmenty.

Penalizační vzdálenost je využita v situacích odpovídajících následujícím dvěma obrázkům. Obr. 7 znázorňuje slepou ulici Švestkovou, kde nelze navázat na infrastrukturu jinak než otočením vozidla, přičemž modrý segment představuje hranu s kontejnerem k obsluze. Nehledě na lokaci kontejnerů na sběrných hranách, je projety vždy celý segment, a to v obou směrech (před otočkou a po otočce).



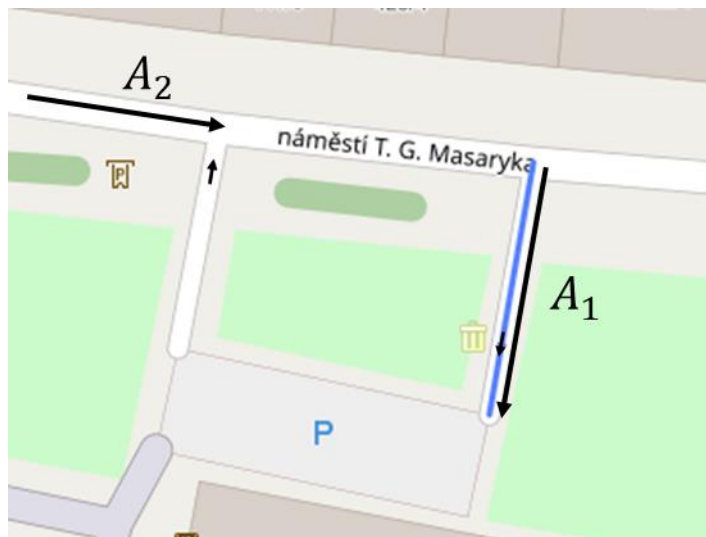
Obr. 7 Situace A – zavedení penalizační vzdálenosti při otáčení

Obr. 8 znázorňuje situaci, kdy by nebylo nutné provést otočku v křižovatce, ale mohl by se objet celý blok po ulicích Hlavní, Horova, Klidná a Pod Kruhovkou, čímž by bylo docíleno navrácení se do původního bodu, avšak s vozidlem otočeným v požadovaném směru. Postup uvedený v algoritmu na obr. 5 je však stále stejný, tudíž nelze zaručit nalezení nejkratší cesty na jakoukoli jinou část infrastruktury (modrý úsek v situacích A i B je stále penalizovaný). Pro tyto dvě situace (A, B) jsou tak zavedeny penalizační vzdálenosti (např. 50 m).



Obr. 8 Situace B – zavedení penalizační vzdálenosti při otáčení

Při sestavování matice vzdáleností může nastat situace, kdy neexistuje nejkratší cesta ze segmentu A_1 na segment A_2 . To je způsobeno chybami v původní infrastruktuře OSM. Příklad takovéto chyby je znázorněn na obr. 9, kde jednosměrná ulice ústí na parkoviště, které není v grafu považováno za hranu. Po obsluze příslušného kontejneru, tak sběrné vozidlo nemůže pokračovat v cestě. Tyto případy jsou ošetřeny tak, že namísto hledání trasy z bodu a_1^{end} do bodu a_2^{beg} , je hledána délka trasy reverzní. Tato vzdálenost je pak vložena do příslušných matic.



Obr. 9 Jednosměrná ulice s kontejnerem bez návaznosti na další infrastrukturu

3.4.2 Časová náročnost svozu

Důležitou roli při plánování svozu hraje i přepravní čas. Ten může být pro jednotlivé hrany tvořící dopravní síť stanoven na základě identifikace silniční třídy (povolená rychlost) a délky úseku nebo historických dat. Svoz odpadu se však převážně odehrává ve městě, kde je sice stejná maximální povolená rychlosti, ale reálně dosažitelná se liší úsek od úseku. V modelu jsou defaultně uvažovány dvě hlavní rychlosti:

- *Obslužná rychlost* (přejíždí-li se úsek mezi 2 křižovatkami, kde se nachází alespoň jeden kontejner k obsluze) – běžně bývá v rozmezí 5–15 km/h.
- *Přejezdová rychlost* (přejezdy mezi segmenty k obsluze) – v závislosti na typologii svozové oblasti se pohybuje v rozmezí 15 až 30 km/h.

Jsou-li dostupná detailnější data, je možné na každou sběrnou hranu uvažovat jinou obslužnou rychlost. Stejně tak lze uvažovat přejezdovou rychlost v závislosti na projížděné lokalitě. Z monitoringu sběru odpadu, kde se zaznamenává čas obsluhy sběrných míst, lze odhadnout průměrnou rychlost podle následujícího vztahu:

$$v_V = \frac{d^T}{t^{Total} - t^{Serv} - t^{Unload} - t^{Lunch}}, \quad (1)$$

kde v_V je rychlost vozidla, d^T je celkově najetá vzdálenost, t^{Total} je celková doba svozu (tj. rozdíl ukončení a zahájení svozu), t^{Serv} je součet dob obsluhy všech sběrných nádob ze svozového plánu, t^{Unload} je čas potřebný k výsypu vozidla na koncovém zařízení a t^{Lunch} je čas na přestávku na oběd. Při aplikování tohoto postupu na více tras lze odhadnout průměrné přepravní rychlosti pro různé svozové oblasti (např. městské části), které pak mohou být využity pro výpočet přepravního času mezi segmenty. V případě přejezdu mezi

oblastmi je vhodné využít poměrového koeficientu vzdálenosti pro výpočet váženého průměru.

Tyto parametry pak vstupují do modelu a výsledkem je odhadnutý čas na přejetí jednotlivých hran nebo delších úseků. U sběrných hran je dále nutné uvažovat čas potřebný k obsluze sběrných míst. Výsledný čas je ovlivněn počtem a typem sběrných nádob, avšak každá nádoba má své specifikace týkající se její dostupnosti a lokace. Tyto parametry významně ovlivňují čas potřebný k obsluze konkrétní sběrné nádoby, popř. sběrného místa. Časy obsluhy sběrných nádob jsou vysoce variabilní, přičemž se převážně pohybují v rozmezí uvedeném v tab. 5. Obsluha více menších nádob na stejném stanovišti však může trvat kratší dobu, jelikož jsou zaměstnanci i sběrné vozidlo schopni manipulovat se dvěma nádobami zároveň.

Tab. 5 Odhadované intervaly obsluhy sběrných nádob podle typu

Nádoba [L]	120	240	1100
Čas [s]	15–70	15–70	30–120

V případě zaznamenávání času obsluhy pro každé sběrné místo je namístě vyhodnotit data statisticky. Ze zkušeností však tato data obsahují spoustu chybných záznamů, takže je potřeba využít postupy na odstranění extrémních hodnot a až následně aplikovat odhady střední hodnoty, percentilů apod.

Další úpravu časů může způsobit zohlednění průjezdu přes křižovatku se semaforem. Na základě získaných tras pomocí algoritmu z obr. 5 se identifikuje počet křižovatek se semaforem. Podle uvažovaného průměrného zdržení se pak vygeneruje matice zdržení, která se dále využije ke konstrukci časové matice. Časová matice se sestaví s využitím matice vzdáleností hran a dále s uvažovanými rychlostmi na jednotlivých hranách. Na závěr se k ní přičte matice zdržení.

3.4.3 Přeprava odpadu a zpracovatelské zařízení

V rámci svozu KO hraje významnou roli i umístění zpracovatelského zařízení. Jeho vzdálenost od svozových tras ovlivňuje přepravní náklady a časovou vytíženost vozidel. Do vyhodnocení celého systému vstupují parametry o umístění (GPS souřadnice a ID příslušných uzlů), typ zpracovávaného odpadu, doba výsypu a manipulace v rámci areálu.

V roce 2018 se téměř polovina KO uložila na skládkách, přičemž stanoveným cílem pro rok 2035 je 10 %. Tohoto cíle lze dosáhnout větší mírou separace a následné recyklace (materiálové využití, např. norská společnost Orkla Group Procurement plánuje mít všechny své obaly do roku 2025 znovupoužitelné), ale zároveň i energetickým využitím v ZEVO (Praha, Brno, Liberec, Plzeň), které se stane nutností pro nerecyklovatelný odpad. Při vzdálenějším zpracovatelském zařízení, se často využívá překládacích stanic, kde se odpad přeloží na jízdní soupravy a někdy ještě slisuje, čímž je dosaženo nižší přepravních nákladů na tunu odpadu. Další zpracovatelská zařízení KO jsou kompostárny a bioplynové stanice (bioodpad), třířídovací linky (ostatní separovaně sbírané složky), jejichž technicko-ekonomické modely byly rozpracovány v dizertační práci (Gregor, 2019).

V infrastruktuře ČR jsou dvě hlavní možnosti přepravy odpadu do zařízení, a to přeprava silniční a železniční. V případě silniční přepravy má velký vliv na náklady typ vozidla, převážený odpad, zpoplatnění silnic, a hlavně množství přepravovaného odpadu.

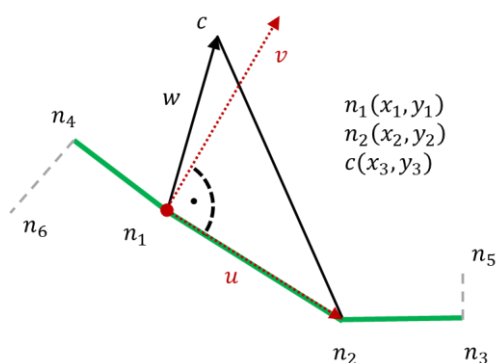
V tokových úlohách se pro každou hranu sestaví závislost ceny přepravy na množství odpadu, která vykazuje nelineární charakter a také skokové prvky. Vstupem do zmiňovaných úloh je potom linearizovaná rovnice závislosti ceny přepravy na přepravovaném množství a vzdálenosti, která je detailněji řešena v práci (Gregor et al. 2017). V rámci infrastruktury se dále musí zohledňovat omezení v dopravě jako výška a váha vozidla (mosty, zákazy, železniční přejezdy apod.).

Druhou možností je přeprava odpadu po železnici. V ČR je velice rozvinutá železniční síť, avšak tento způsob přepravy odpadů dosud není mnoho využíván z důvodu velkých nákladů souvisejících s manipulací odpadu. Z environmetálního hlediska je sice tento způsob upřednostňován, nicméně jeho využití ve větším měřítku je nutné ještě podrobit detailnějším analýzám a výpočtům.

3.4.4 Redukce úlohy

Vzhledem k obrovskému množství sběrných nádob v každém městě je vhodné zmenšit velikost úlohy, přičemž hlavním důvodem k redukcí je enormní časová náročnost výpočtu. Za tímto účelem je navržena metodika pro párování sběrných nádob k jednotlivým segmentům dopravní sítě a vytvoření množiny tzv. svozových hran. V případě nekompletních dat týkajících se adresních bodů nebo polohy kontejnerů je možné využít databázi serveru (openstreetmap.org) k doplnění datové sady.

Algoritmus pro párování nejprve identifikuje hrany, u kterých koresponduje adresa se sběrnou nádobou (zelené v obr. 10a). Poté je proveden výpočet vzdáleností k této množině hran a výběr té nejbližší (tzn. určení bodů n_1 a n_2 v obr. 10a). Proces výpočtu pokračuje, pokud je vybraná hrana obousměrná s nemožností obsluhy obou stran. V takovém případě je nutné přiřadit sběrnou nádobu (bod c) ke konkrétnímu směru (hrana z n_1 do n_2 nebo opačně). O přiřazení lze rozhodnout na základě znaménka skalárního součinu vektoru hrany a vektoru spojnice bližšího bodu hrany s bodem sběrné nádoby. Tento postup je schematicky znázorněn na obr. 10a) a celý algoritmus pro vyhodnocení je pak na obr. 10b). Nejprve je identifikován bližší a vzdálenější bod z odpovídajícího segmentu a pak na základě výsledku skalárního součinu je kontejner finálně přiřazen. V případě, že je výsledek roven nule (souřadnice kontejneru leží přímo na vektoru segmentu), tak je přiřazení provedeno náhodně.



a) Rozložení bodů, hran a vektorů

```

1:  $D^C \leftarrow \text{ClosestPointFromContainer}(n_1, n_2)$ 
2:  $D^F \leftarrow \text{FurthestPointFromContainer}(n_1, n_2)$ 
3:  $T = (x_3 - x_2)(y_1 - y_2) + (y_3 - y_2)(x_2 - x_1)$ 
4: if  $T > 0$  then
5:   Assign container  $c$  to arc  $(D^C, D^F)$ 
6: else if  $T < 0$  then
7:   Assign container  $c$  to arc  $(D^F, D^C)$ 
8: else
9:   Unable to decide: Choose randomly
10: end if

```

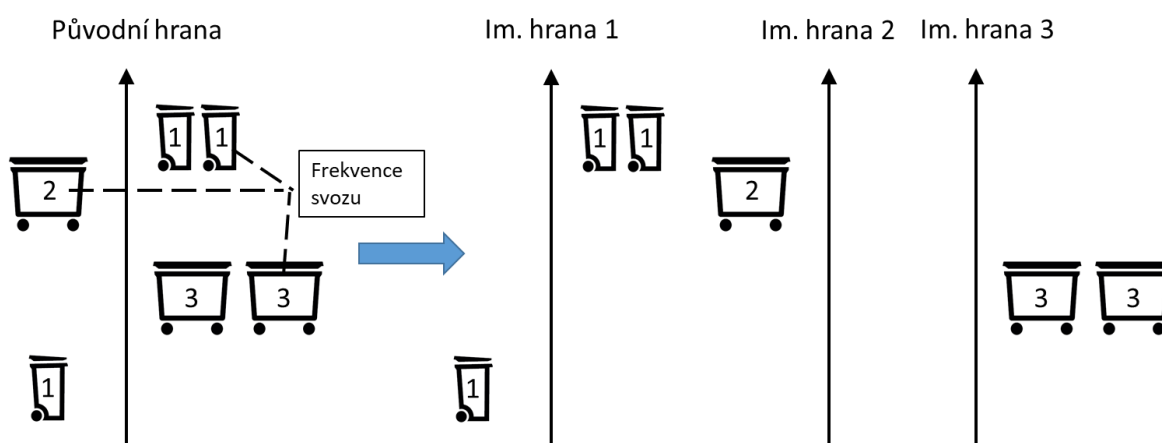
b) Algoritmus přiřazení

Obr. 10 Identifikování směru sběru dané nádoby

V případě, že je hrana oboustranně obsluhovatelná, tak je potřeba sběrnou nádobu přiřadit k hranám obou směrů a přidat jim parametr o jejich vztahu (tzv. hrany k sobě inverzní).

Počet inverzních hran lze dále redukovat za předpokladu, že lze bez penalizace najet na segment pouze z jedné strany.

Dalším krokem je agregace množství odpadu (sběrných nádob) na hraně dle frekvence svozu. Nejprve se vytvoří skupiny (*Groups*) podle vyskytovaných frekvencí, do kterých se roztrídí všechny nádoby. Poté se v rámci skupin agreguje množství odpadu a vytvoří se imaginární hrany. Tento postup je ilustrován na obr. 11, kde se na jednom segmentu vyskytují sběrné nádoby s různými frekvencemi (konkrétně 1x týdně, 2x týdně a 3x týdně). Po vytvoření těchto imaginárních hran je dále nutné provést specifické úpravy matice, aby byla zachována stejná metrika jako doposud.



Obr. 11 Schéma tvorby imaginárních hran (čísla ve sběrných nádobách symbolizují frekvenci svozu)

Agregace sběrných nádob však musí probíhat pouze do stanovené maximální kapacity vozidla z vozového parku (taková situace by však na reálné ulici neměla nastat, jde proto spíše o ošetření pro obecnost). V případě překročení této hodnoty se přejde k vytvoření další hrany. V případě separovaně sbíraných odpadů je možné uvažovat umístění kontejneru do křižovatky (vytvoření hrany se stejným začátkem i koncem). Tato operace se provede v případě splnění podmínky na maximální vzdálenost sběrné nádoby od křižovatky. V praxi tato možnost představuje přemístění sběrné nádoby obsluhou k popelářskému vozu a zpět. Tento postup však není doporučován, protože možnost sběru v křižovatce není všude možný a musely by se procházet konkrétní případy ručně.

Vytvoření imaginárních hran si vynucuje specifické operace související s úpravou matic. Týká se to jak matice časové, tak matice vzdáleností. Matice je nutné modifikovat na základě skupin vytvořených imaginárních hran, přičemž vzdálenost (čas) v rámci skupiny musí být nastavena na hodnotu nula. Naopak vzdálenost z jakékoliv jiné hrany na imaginární hranu musí být navýšena o délku (čas) této hrany (*ArcID.Value*). Penalizace je zde zavedena pro tzv. inverzní imaginární hrany, pro zamezení otáčení v křižovatce. Další úprava musí proběhnout s hodnotou délky (času) pro všechny imaginární hrany, která musí být nastavena na hodnotu nula. Postup úpravy matice je popsán v algoritmu na obr. 12.

```

1: Create Groups of Imaginary Arc
2: for all Group in Groups do
3:   for all ArcID in Group do
4:     for all Row in Matrix do
5:       Matrix[Row, ArcID] += ArcID.Value
6:     end for
7:     for all ArcID2 in Group do
8:       if ( thenArcID.begin = ArcID2.begin)
9:         Matrix[ArcID, ArcID2] = 0
10:      else
11:        Matrix[ArcID, ArcID2] = penalization
12:      end if
13:    end for
14:  end for
15: end for

```

Obr. 12 Algoritmus úpravy matic kvůli imaginárním hranám

3.5 Emise

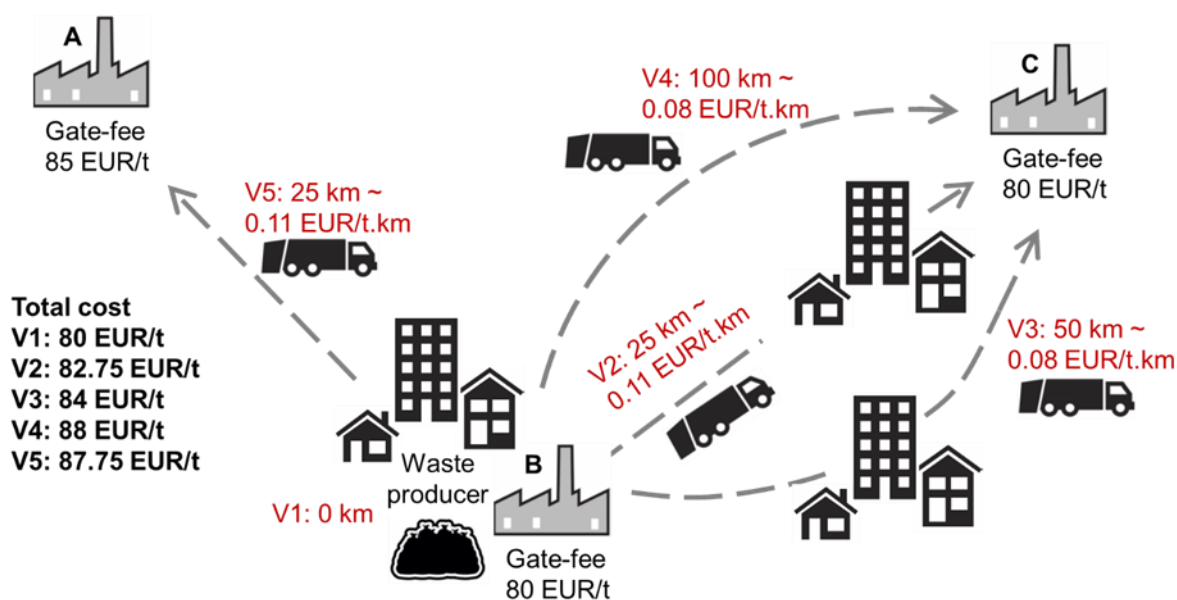
Návrh sběrné infrastruktury, svoz odpadu i další systémy řetězce nakládání s odpadem musí být vyhodnoceny z pohledu životního prostředí či dopadů na obyvatelstvo. Pro posouzení celého systému nakládání s odpady se využívá LCA (Life Cycle Assessment). Je to metoda založená na vyhodnocení všech fází života nějakého produktu včetně všech operací kolem něj (zpracování, výroba, distribuce, používání, oprava, údržba atd.). V rámci LCA může být využito některého z indikátorů pro vyhodnocení konkrétního dopadu. Pro globální dopad produkovaných polutantů na skleníkový efekt a oteplování se využívá tzv. GWP (Global Warming Potential) indikátor, který vyjadřuje relativní míru zachytu tepla v atmosféře skleníkovými plyny. Je zde uvažován přepočet skleníkových plynů na jednotku CO_2eq^4 . Tento přepočet vychází z pravidelných vyhodnocovacích zpráv, které provádí *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, a tak se časem mírně mění. Výsledná hodnota vypočítaného GWP závisí na uvažovaném časovém horizontu (nejčastěji 20, 100 a 500 let), v rámci kterého se dopad polutantu uvažuje (viz „GHG Protocol“ pro GWP hodnoty vztažené k horizontu 100 let). CO_2 se u průmyslových podniků obchoduje na trhu s emisními povolenkami, kde jejich cena v průběhu roku 2018 překročila hodnotu 20 EUR/t CO_2 a nad touto hranicí se drží dodnes (srpen, 2020). V OH však zatím nejsou tyto povolenky zavedeny, nicméně při zavedení jejich hodnota může hrát významnou roli při výstavbě nových zařízení (kapacita, umístění, typ zařízení). Vzniklá úspora oproti využívání fosilních paliv by pak mohla kompenzovat vyšší náklady. Z lokálního pohledu však produkce CO_2 přímo neovlivňuje jedince žijící v okolí zdroje emisí (v malých koncentracích neškodí zdraví člověka), avšak značný vliv může mít až sekundárně. Výrazně citlivěji ovlivňují populaci provozní efekty související s lokálním znečištěním, mezi které patří rozvířený vzduch, uvolňování částic pneumatik a dalších částí vozidla, popř. vozovky do ovzduší.

⁴ Emisní faktory pro některé polutanty, energetické využití nebo dopravu lze nalézt např. na: https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf.

V rámci logistiky odpadu jsou předmětné hlavně emise z dopravy. Hlavní látky automobilových emisí vznikajících při spalování pohonných hmot jsou:

- oxid uhelnatý (CO),
- oxid uhličitý (CO₂),
- *volatile organic compounds* (VOC) včetně uhlovodíků (HC),
- oxidy dusíku (NO_x),
- prachové částice (PM),
- oxid siřičitý (SO₂),
- a další.

Tyto látky způsobují člověku zdravotní potíže (podráždění sliznice, očí, dýchací potíže, karcinogeny apod.). Lokální dopad na obyvatelstvo z produkovaných polutantů se může měřit pomocí HTP. Metodika pro výpočet dopadu emisí z přepravy odpadu byla pro dopravní úlohy z OH představena v (Nevrlý et al., 2017) a rozšířena v (Nevrlý et al., 2018). Schéma na obr. 13 znázorňuje základní myšlenku výpočtu. Jsou zde tři lokality pro zpracování odpadu, tj. varianta A, která je situována mimo město (emise ze zpracování a transportu odpadu nemají dopad na obyvatelstvo), varianta B uvažuje zařízení přímo ve městě (téměř nulový dopad z dopravy, ale možný dopad ze zpracování) a varianta C, kde je zpracovatelské zařízení mimo město a jsou k němu možné další 3 možnosti přepravy odpadu (každá z nich za jinou cenu a přes odlišně obydlené území). Každá z uvažovaných variant může být podle metodiky (zohledňující vzdálenost od zdroje emisí a rozmístění adresních bodů s obyvateli) ohodnocena a tyto údaje dále mohou vstupovat do vícekritériálního optimalizačního modelu. Cílem takového modelu by pak bylo nalézt vhodný kompromis mezi celkovými náklady na dopravu a zpracování odpadu a dopadem emisí na obyvatelstvo. Představená metodika však není vhodná pro svozové úlohy, kde každá ulice s alespoň jednou sběrnou nádobou musí být obsloužena.

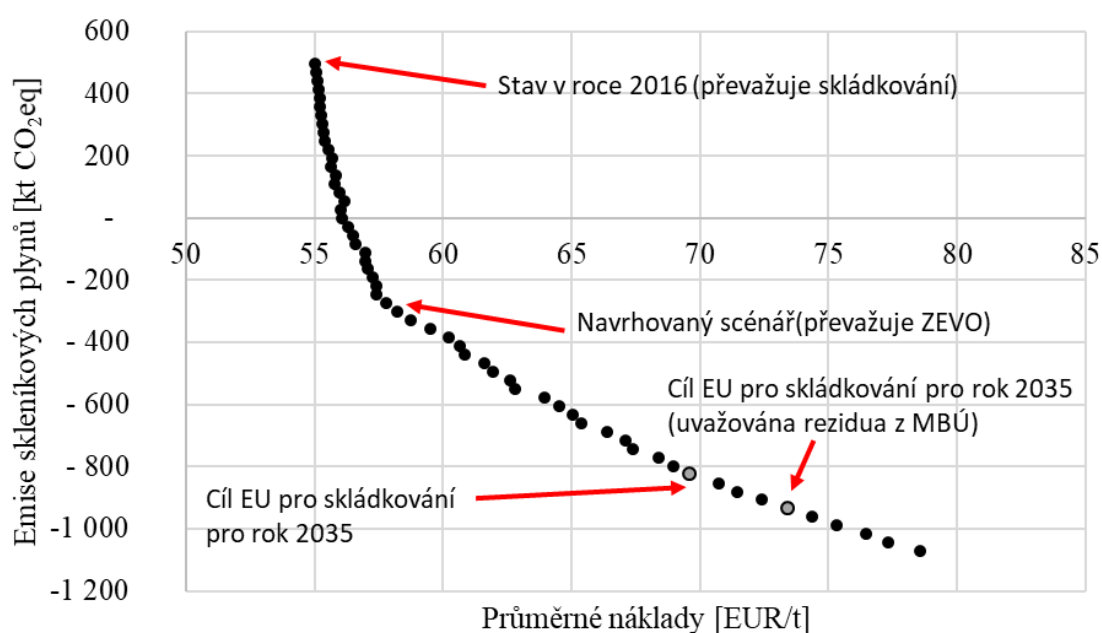


Obr. 13 Možnosti přepravy odpadu s ohledem na cenu dopravy a průjezd obydlenými oblastmi (Nevrlý et al., 2018)

Produkce polutantů a výpočet spotřeby při svozu odpadu mohou být dále inspirovány článkem (Beijoco et al., 2010), kde byly trasy sestavovány pomocí GIS systému s cílem

upravit frekvenci svozu na základě historických dat naplněnosti, nebo (Agar et al. 2007), kde byly využity data GPS pro vyhodnocení spotřeby a odhadu emisí. Svoz odpadu na základě produkce emisí byl definován jako úloha *Pollution Routing Problem*, která byla s mnoha zohledněnými aspekty analyzována v (Bektaş a Laporte, 2011).

Globálnější vyhodnocení produkce skleníkových plynů v rámci komplexního pohledu na OH České republiky bylo analyzováno v (Nevrlý et al., 2019c). Byl zde navrhnout matematický model pro přechod k environmentálně šetrnějšímu nakládání s odpady. Článek analyzuje vztah mezi emisemi skleníkových plynů a náklady na zpracování a dopravu SKO, přičemž je vyhodnocen dopad různých způsobů zpracování odpadu. Výsledky jsou prezentovány v případové studii pro Českou republiku na úrovni obcí s rozšířenou působností (206 uzlů/producentů odpadu), dále je zde uvažováno 148 skládek, 113 potenciálních zařízení na mechanicko-biologickou úpravu, 24 potenciálních lokalit pro elektrárny využívající tuhá alternativní paliva, 4 existující ZEVO a 32 potenciálních lokalit pro nová ZEVO. Navrhovaná budoucí koncepce je srovnávána se stavem z roku 2016, kdy bylo na skládku ukládáno 73 % SKO. Cílem studie bylo nalézt kompromis mezi ekonomicky životaschopným a environmentálně přijatelným řešením. Výsledky studie poukazují na možné snížení emisí skleníkových plynů o téměř 150 %, přičemž náklady se zvýší pouze o 2,5 EUR/t (viz obr. 14). Detailnější rozbor celého přístupu je proveden v (Nevrlý et al., 2019c), kde jsou dále rozvedeny doporučení výstavby jednotlivých zařízení pro všechny regiony ČR. Analýza budoucích stavů s ohledem na cíle EU má velký vliv na vznik nových odpadových proudů a související změnu množství a složení SKO, což má přímý dopad na existující svozové plány (nutnost modifikace, změna rozmístění a kapacit sběrných nádob).



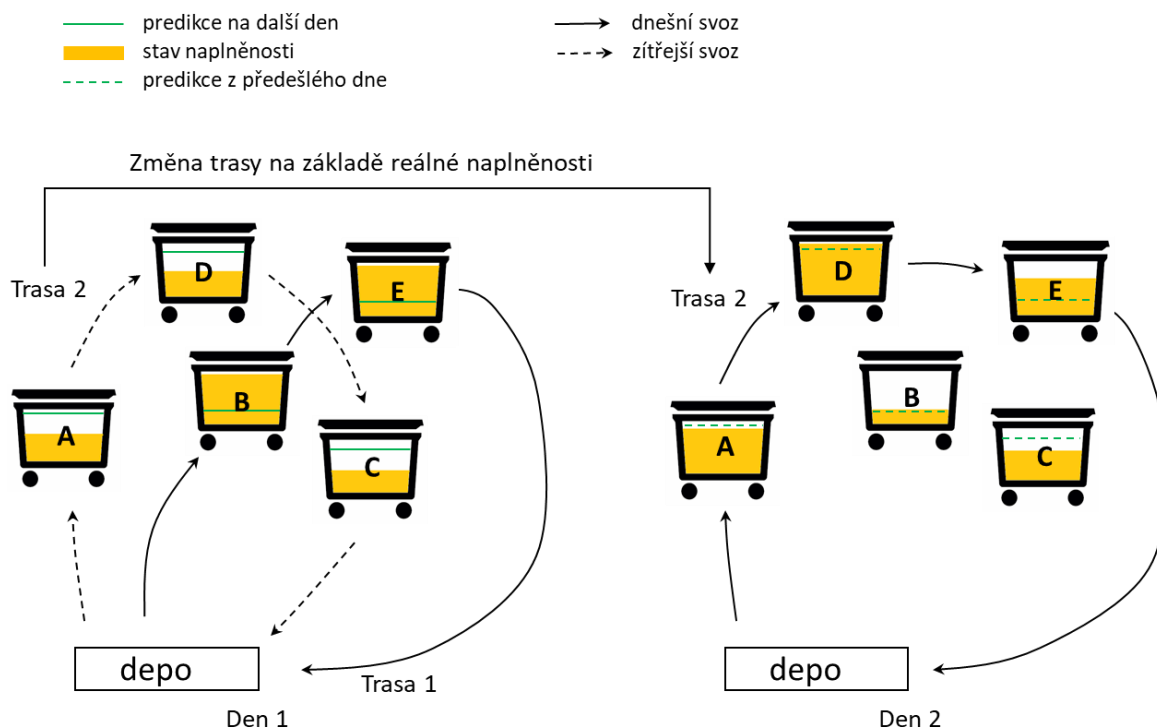
Obr. 14 Příspěvek skleníkových plynů ve vztahu ke změně technologií a souvisejícím průměrným nákladům na celý řetězec zpracování odpadů (Nevrlý et al., 2019c)

4 MATEMATICKÉ MODELÝ A HEURISTIKY

V rámci modelu i heuristik navazuje dizertační práce na diplomovou práci (Nevrlý, 2016). Model může nově podle potřeb zohledňovat různá rozhodovací kritéria v účelové funkci – čas, vzdálenost, spotřeba, emise či náklady. Matematický model pro plánování svozových tras a základní heuristický postup je detailně popsán v článku (Nevrlý et al., 2019b). Vyvíjená heuristika je dále doplněna o některá nová omezení a požadavky definované v kapitole 2.6. Dále byla implementována možnost volby pro dny svozu. Jedna varianta uvažuje fixní dny svozu dle aktuálního plánu. V druhé variantě je cílem vytvořit návrh dne svozu pro všechny sběrné nádoby. Zde se generují přípustné kombinace dnů svozu na základě požadované frekvence. V aktuální populaci přípustných řešení se často objevují identická řešení, takže další algoritmus analyzuje existenci klonů v populaci řešení. Před zařazením nového jedince do populace se pak provádí test na existenci klonu.

4.1 Návrh dynamického VRP modelu

V rámci spolupráce s kolegy z Univerzity Tomáše Bati a Molde University College v Norsku, byl představen VRP model, který zohledňuje vývoj naplněnosti sběrných nádob v průběhu svozového týdne (Hrabec et al., 2019). Model uvažuje, že jsou na sběrných nádobách instalovány senzory snímající aktuální naplněnost. Kromě poskytování informací o současných úrovních lze hodnoty použít k odhadu, jakou rychlostí se hromadí odpad v každé nádobě. Pro testovací účely však byl uvažován konstantní přírůstek za den. Problém je vždy řešen na základě známých úrovní naplnění pro 1. den, přičemž bere v úvahu také odhadovanou míru akumulace odpadu pro nadcházející dny (2. až 7.). Řešením je plán tras pro dny 1 až 7. Tento proces se opakuje a svozové plány se tedy řeší každý den, když se aktualizují údaje o aktuální naplněnosti. Druhý den se tedy navrhne nové trasy a vznikne tak plán pro dny 2 až 8. Tento princip je ilustrován na obr. 14.



Obr. 15 Schéma principu navrženého VRP přístupu (Hrabec et al., 2019)

Plánované trasy se mohou změnit ze dvou důvodů. První z nich je z podstaty náhodného plnění odpadu ve sběrných nádobách. Druhým důvodem je návrh samotného modelu, protože v něm neexistuje žádné omezení týkající se požadované míry naplnění na konci analyzovaného období. Z tohoto důvodu se pak v nalezeném řešení v posledních dnech bude naplněnost sběrných nádob blížit jejím kapacitám. Detailněji je samotný model i přístup popsán v článku (Hrabec et al., 2019).

4.2 Startovací řešení z reálného monitoringu svozu odpadu

V heuristických algoritmech na bázi genetického přístupu je velice důležité disponovat nějakými kvalitními startovacími řešeními (*initial solution algorithm*). Běžně jsou využívány metody, které využívají logických kroků k postupnému naplnění kapacity vozidla pomocí sběrných nádob ve stejné lokalitě. Po naplnění kapacity je uvažován výsyp a v případě, že není překročeno časové omezení, je možné zahájit další trasu. Těchto metod založených na „hladovém algoritmu“, *path-scanning* heuristikách a podobných postupech je nepřeberné množství, avšak jejich výsledkem jsou řešení velice vzdálená těm optimálním. Z tohoto důvodu je příhodné využít historických svozů k sestavení nového svozového plánu jako jednoho ze startovacích řešení pro meta-heuristický algoritmus.

Dále bude rozebrán postup pro generování inicializačních řešení na základě dat z konkrétního monitoringu svozu v minulosti (systém zaznamenávání dat). Předpokládejme pro každý den v rámci týdne zaznamenávání dat o vozidle a jeho postupné obsluze sběrných nádob pod unikátním identifikačním číslem svozu. Posloupnost těchto sběrných nádob může být místy ve špatném pořadí oproti reálnému svozu kvůli způsobu logování dat. Takto jsou dostupná data pro celý svozový týden, tzn., že jsou známá identifikační čísla svozů.

Postup pro generování inicializačního řešení je rozdělen do několika bloků a bude detailněji popsán postupně v pseudokódech algoritmů. Hlavní část algoritmu je uvedena v obr. 16, kde jsou pro každé identifikační číslo svozu definovány posloupnosti sběrných nádob a k nim příslušící segmenty, den a týden svozu, dále jsou zde odstraněny duplicity segmentů, které vznikají v důsledku agregace sběrných nádob na jednotlivé segmenty. Takto vzniklá posloupnost segmentů pro dané vozidlo (*Vehicle*) je pak přiřazena do konkrétního řešení (*Week*) a dne svozu (*Day*). Jakmile je postup zopakován pro všechna identifikační čísla svozu, tak začíná druhá fáze, kde je řešení opraveno v proceduře *Repair Solution*, která doplňuje svoz chybějících kontejnerů a upravuje svoz sběrných nádob dle stanovené frekvence svozu a povolené kombinace dní. Následuje postup, kde jsou posloupnosti svozu segmentů pro všechna vozidla a dny rozděleny do jednotlivých tras, a to podle příslušící kapacity vozidla. Na závěr jsou na řešení aplikovány procedury lokálního prohledávání a takto vzniklé inicializační řešení je vloženo do populace řešení na základě jeho přípustnosti. Procedury *Repair Solution* a *Divide Vehicles into Routes* jsou detailněji rozebrány v dalším textu a pseudokódech.

Procedura *Repair Solution* je patrná z obr. 17. Jejím hlavním cílem je zkontrolovat, zda je splněna požadovaná frekvence svozu v rámci svozového týdne a také jestli jsou dodrženy předepsané rozestupy mezi jednotlivými dny svozu. Jakmile jsou tyto předpoklady ověřeny, tak je algoritmus zaměřen na doplnění chybějících sběrných nádob (podle plánu svozu odpadu) do vznikajícího řešení a odstranění přebytečných svozů. Kontrola a úprava pak probíhá také pro inverzní segmenty, pokud k danému segmentu existují.

```

1: Create empty Solutions
2: SELECT ID COLLECTIONS
3: for all Collection in ID COLLECTIONS do
4:   Find collection Vehicle, Day and Week
5:   SELECT Containers of Collection
6:   Sort Containers by Started
7:   NewVehicle  $\leftarrow$  Find Containers in Segments
8:   NewVehicle  $\rightarrow$  Delete duplicates of Segments
9:   NewVehicle  $\rightarrow$  Local Search of Inverse Segments
10:  Solutions[Week][Day]  $\leftarrow$  NewVehicle
11: end for
12: for all Solution in Solutions do
13:   Solution  $\rightarrow$  Repair Solution
14:   Solution  $\rightarrow$  Divide Vehicles into Routes
15:   Solution  $\rightarrow$  Local Search Procedures
16:   Insert Solution into Population
17: end for

```

Obr. 16 Algoritmus pro inicializaci řešení z historického monitoringu svozu

```

1: for all Segment in Segments do
2:   Check Feasibility of Servicing Days
3:   if not Feasible then
4:     ServicingDays  $\leftarrow$  Find maximum equal ServicingDays
5:     if exist more than one then
6:       Choose: min(TotalViolationTime) AND max(AvailableTime)
7:     end if
8:   end if
9:   for all Day in Servicing Days do
10:    if Segment missing in Routes then
11:      Find Best Insertion: Time  $\leq$  Allowed Time
12:      Segment  $\rightarrow$  Serviced
13:      if Segment has Inversion then
14:        Segment.Inversion  $\rightarrow$  Serviced
15:      end if
16:    else if Segment is extra in Routes then
17:      Delete from Routes
18:      Segment  $\rightarrow$  Not Serviced
19:      if Segment has Inversion then
20:        Segment.Inversion  $\rightarrow$  Not Serviced
21:      end if
22:    end if
23:  end for
24: end for

```

Obr. 17 Repair solution algorithm

Procedura *Divide Vehicles into Routes* pak prochází celé řešení, tedy pro každý den ze svozového týdne a každé vozidlo podle obr. 18 je hledáno optimální rozdělení trasy na kratší dílčí trasy. Zde je podmínkou nepřekročení celkové kapacity, dodržení nejmenšího možného počtu tras a zároveň je hledán nejkratší možný čas celého svozu. Procedura *DivideRoute* je zde volána rekurzivně v případě více postupných dělení jedné trasy.

DivideRoute(Vehicle, trip, maxLoad)

```

1: Load = iter = 0
2: Full ← False
3: Calculate TotalLoad and MaxNbRoutes
4: while not Full do
5:   Segment ← Vehicle[Route[trip]][iter]
6:   if Load + Segment.Waste ≤ maxLoad then
7:     Load += Segment.Waste
8:     Calculate TotalTime with Routes split in iter
9:     if TotalLoad - Load ≤ maxLoad(MaxNbRoutes-1) then
10:      if TotalTime ≤ minTime then
11:        minTime = TotalTime
12:        bestSplit = iter
13:      end if
14:    end if
15:    iter++
16:  else
17:    Full ← True
18:  end if
19: end while
20: if bestSplit not Null then
21:   Vehicle[Route[trip]] → Split in bestSplit
22:   Call DivideRoute(Vehicle, trip+1, maxLoad)
23: end if

```

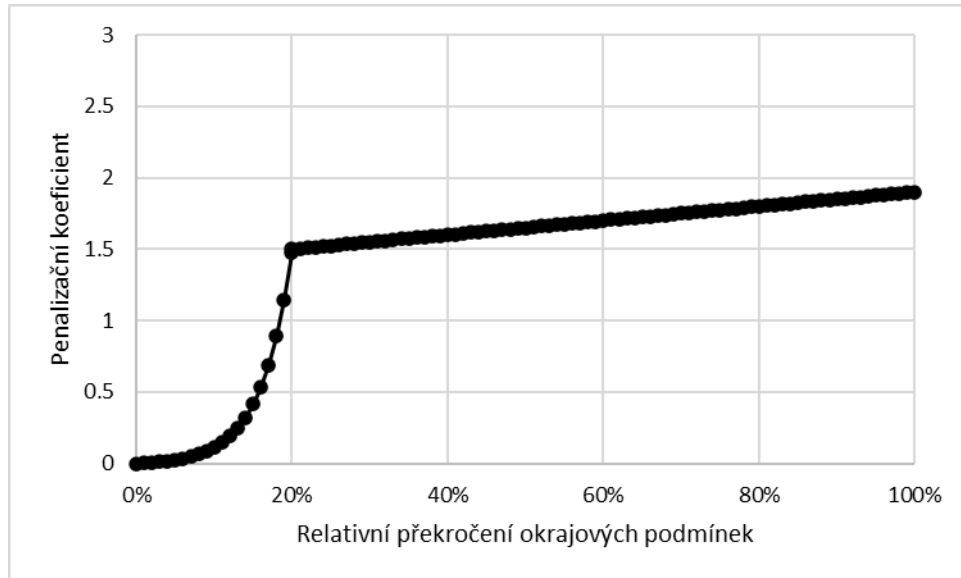
Obr. 18 DivideRoute algorithm

4.3 Penalizace pro překročení okrajových podmínek

Dále byla navržena nelineární funkce pro penalizaci překročení okrajových podmínek (kapacita, čas). Nelineární funkce byla využita, aby při malém relativním překročení kapacity vozidla nebo času celého svozu, nebyla penalizace příliš vysoká. Penalizační koeficient byl navržen podle rovnice (2).

$$penal = \begin{cases} a \cdot (e^{b \cdot RV} - 1), & RV \leq threshold \\ c + d \cdot RV, & RV > threshold \end{cases} \quad (2)$$

Hodnota *penal* představuje penalizační koeficient, který se dále násobí s hodnotou dílčí účelové funkce bez uvažování penalizace (celkově najetá vzdálenost trasy/vozidla) a výsledek je přičítán k *fitness* celého řešení. Koeficienty *a*, *b*, *c* a *d* určují konkrétní tvar funkce. *Threshold* je zvolená hodnota, kde funkce mění tvar a *RV* je relativní překročení dané okrajové podmínky. Ukázka průběhu penalizační funkce pro konkrétní koeficienty *a*, *b*, *c* a *d* je na obr. 19. Podmínkou pro koeficienty *c* a *d* je spojitě navázání v bodě *threshold*. Spojitě navázání na lineární funkci je zde z důvodu příliš rychlého růstu exponenciální funkce. V rámci algoritmu je prováděno srovnávání jednotlivých řešení, je proto nutné zachovat hodnoty funkce v rozumném rozmezí, jelikož se v algoritmu uchovávají i nepřípustná řešení.



Obr. 19 Penalizační funkce

4.4 Návrh shlukovacího algoritmu pro sběrné segmenty

Pro efektivní výpočet větších měst nebo oblastí byl navržen shlukovací algoritmus, který rozděluje sběrné segmenty do separátních podúloh. Každá podúloha je pak řešena samostatně se zvolenými okrajovými podmínkami. Výsledky podúloh jsou dále agregovány pro kompletní trasy (kapacita vozidla využita nad 85 %), které jsou následně považované za jednotlivé segmenty. Navržené trasy s menším naplněním kapacity nejsou agregovány a postupují do dalšího výpočtu v původním formátu, tj. původní segmenty ulic. Tímto postupem je úloha významně zjednodušena. Celý postup vytvoření shluků se segmenty je znázorněn v pseudokódu na obr. 20. Hraniční velikostí jedné úlohy byla stanovena množina o 1000 segmentech.

```

1: K-means clustering of segments,  $K = n \bmod 800$ 
2: for all  $C$  in Clusters:  $size(C) > 1000$  do
3:   Redistribute segments
4:   for all  $s$  in Segments of  $C$  do
5:     Search  $C^* \in Clusters$ :  $\min \text{dist}(s, \text{centroid of } C^*)$ :  $size(Clusters) < 1000$ 
6:     Cluster  $C \rightarrow \text{Lock}$ 
7:   end for
8: end for
9: Unlock all Clusters
10: for all  $C$  in Clusters do
11:   Calculate  $TotalWeight$  of waste in  $C$ 
12:   while  $TotalWeight < MinWeight$  do
13:      $C \leftarrow$  Steal closest segment  $s$  from  $C^*$ :  $\text{weight of } C^* - \{s\} \geq MinWeight$ 
14:   end while
15:   Cluster  $C \rightarrow \text{Lock}$ 
16: end for

```

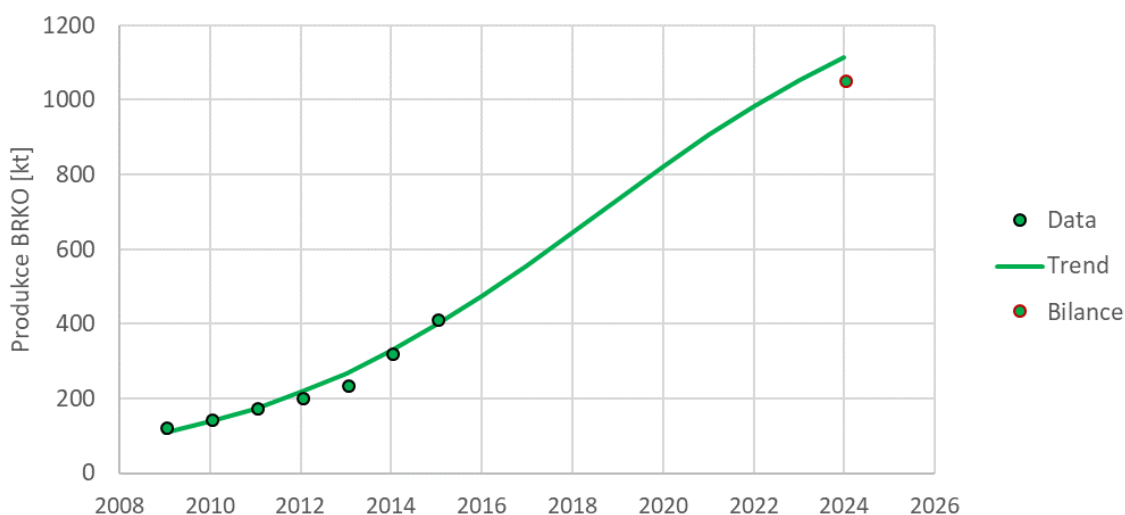
Obr. 20 Algoritmus shlukování segmentů

5 PŘÍPADOVÉ STUDIE DÍLČÍCH PROBLÉMŮ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vývoj komplexního nástroje a postupné přidávání nových funkcionalit umožňuje průběžné zpracování reálných dat. Dílčí výsledky pak slouží nejen jako zpětná vazba v rámci testování funkčnosti, ale i k námětům pro další vývoj. V dalším textu budou představeny některé případové studie související s různými způsoby uplatnění vyvíjeného přístupu. Některé průběžné výstupy byly publikovány a nebudou tak více rozebírány. Lze uvést např. publikaci (Šomplák et al., 2019a), kde byl testován algoritmus s využitím inicializačního řešení. Na tuto studii přímo navazuje rozšíření o vyhodnocení produkce a potenciální úspoře skleníkových plynů v rámci svozu odpadu (Nevrlý et al., 2019d).

5.1 Odhad nákladů na svoz a sběr *BRKO*

Jednou z nedávných analýz je prognóza produkce biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO, kat. č. 20 02 01) a odhad nákladů na jeho sběr a svoz v obci s rozšířenou působností (ORP) Tábor. Analýza BRKO byla provedena vzhledem k velkým meziročním změnám v jeho produkci (oproti ostatním frakcím). Nárůst produkce je způsoben povinnostmi obcí od roku 2014 umožnit oddělený sběr. Následkem je změna trendu a více jak 20% meziroční nárůst v posledních letech. Uvažována byla data pro odpad spadající do obecního sběru. Prognóza (Šomplák et al., 2018a) byla modelována pomocí tzv. logistické křivky (S-křivka), přičemž limitní hodnota byla stanovena dle zástavby (bytová zástavba 60 kg/obyv./rok, rodinné domy 200 kg/obyv./rok). Horní hranice pro celkovou produkci BRKO v ČR byla stanovena na hodnotu přibližně 1400 kt/rok. Výsledný odhad budoucí produkce dle logistické regrese je uveden na obr. 21. Balance zde upravuje výsledek trendové složky s ohledem na regionální vazby v rámci ČR.



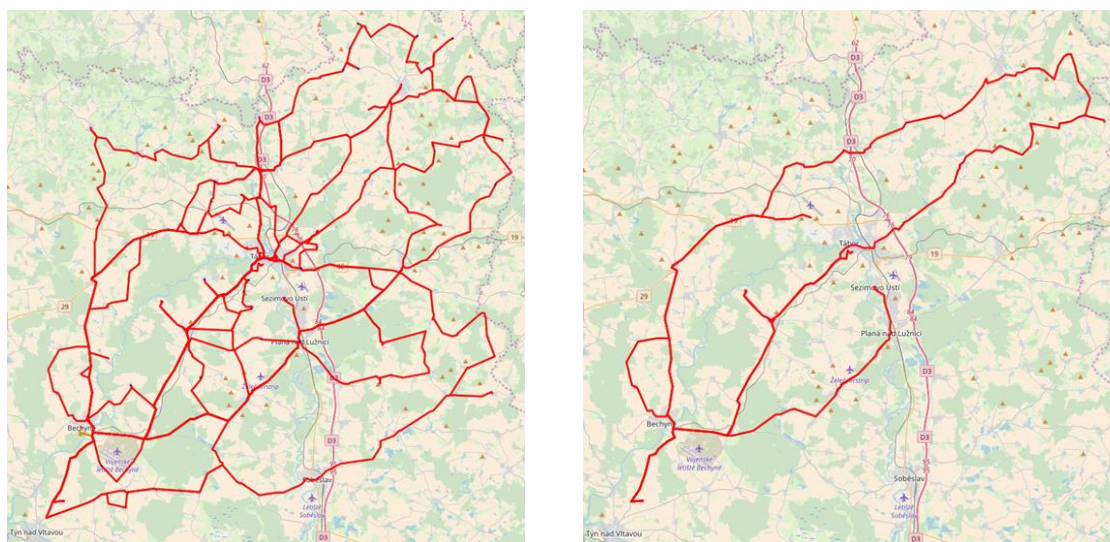
Obr. 21 Výhled pro produkci BRKO v ČR (Šomplák et al., 2018a)

Z výsledků je patrný výrazný nárůst produkce do roku 2024. V dalších letech je možné očekávat zmírnění růstu (okolo roku 2019 lze očekávat změnu rychlosti růstu) a postupné přibližování k limitní hodnotě produkce. Stejným způsobem byl analyzován trend v datech pro menší územní celky, a to pro kraje a ORP. Aby byl zaručen soulad ve výsledcích prognózy, tj. souhrnná produkce v nižších územních celcích je rovna produkci

v hierarchicky nadřazenému územnímu celku, bylo nutné výsledky prognózy vhodně korigovat, viz (Pavlas et al., 2017).

Výše zmíněný postup byl aplikován na lokalitu Tábořsko, kde byla problematika BRKO řešena, což dokládá studie (ZERA, 2016). Produkce BRKO byla pro celé ORP pro rok 2024 odhadnuta na cca 8900 tun. Na základě údajů o budoucí produkci pro jednotlivé obce byl dále proveden odhad budoucích nákladů na sběr a svoz. Ten je založen na optimalizačním výpočtu. V tomto případě je cílem navrhnout ekonomicky nejvýhodnější svozové trasy, včetně vhodné volby vozového parku s ohledem na budoucí produkci odpadu. Ekonomické vstupy byly získány z interní aplikace *Waste Transportation Prices* (vyvíjeno na ÚPI (Gregor, 2019)), která vypočítá cenu dopravy pro konkrétní dopravní systém, množství přepravovaných odpadů a zvolenou trasu. Zahrnuje mnoho přepravních systémů a jejich kombinací, včetně nezbytné překládky. Jako zpracovatelské zařízení byla vybrána kompostárna v obci Jarošovice vzdálená přibližně 30 km od města Tábor. Svoz odpadu v ORP Tábor byl simulován pro období duben až říjen s průměrnou týdenní produkcí BRKO cca 280 t (předpokládá se týdenní frekvence svozu). Období svozu je dáno produkcí BRKO ze zahrad, který představuje zásadní podíl na celkové produkci. Odpad z kuchyní je v současné době produkován pouze v omezené míře. Ve vozovém parku byl uvažován svozový vůz se třemi nápravami s kapacitou 9 t s lineárním lisem a pracovní dobou 5 dní v týdnu.

Výsledky svozových tras ORP Tábor pro BRKO v roce 2024 jsou uvedeny na obr. 22. Vlevo (obráz. 22a) jsou uvedeny všechny svozové trasy pro všechny použité svozové vozy. Algoritmus doporučil 3 vozy předepsaných parametrů (nosnost 9 t BRKO). Na obr. 22b) jsou pak zobrazeny svozové trasy pro jeden pracovní den, konkrétně pro středu. Zde zobrazené trasy pak zahrnují jednu delší okružní jízdu přes obce s menší produkcí a několik kratších tras se svozem lidnatějších oblastí (Tábor, Sezimovo Ústí a Planá nad Lužnicí).



a) Agregovaná data – všechny pracovní dny

b) Konkrétní svozový den – středa

Obr. 22 Prognóza svozových tras BRKO v ORP Tábor v roce 2024

Agregovaná svozová vzdálenost pro všechny vozy vyšla 2 010 km v rámci jednoho svozového týdne. Využití kapacit svozových vozů převyšuje 90 %, což by mohlo být problematické v případě krátkodobě zvýšené produkce. Při detailnější analýze by bylo vhodné simulovat jednotlivé měsíce zvlášť a roz distribuovat tak produkci dle reálného

trendu. Dále by pak bylo možné zpřesnit výsledky zvýšením detailu v agregaci produkce. Zde byly uvažovány obce a městské části jako body k obslužení, přičemž časové zdržení bylo počítáno na základě průměrných hodnot. Při ekonomické analýze byly zahrnuty fixní náklady na odpisy vozů ve výši 4 422 tis. Kč. Variabilní náklady zahrnující palivo, mzdy (svoz pouze v některých měsících) a náklady na údržbu (pneumatiky, olej atd.) představují 2 546 tis. Kč. Celkové náklady vztažené na jednu tunu BRKO vyšly pro rok 2024 na 784 Kč a po přepočtu na obyvatele pak 87 Kč. Náklady na svoz v ORP Tábor jsou negativně ovlivněny zvolenou lokalitou pro zpracování BRKO (Jarošovice, cca 30 km od města Tábor). Pro snížení nákladů by bylo vhodné uvažovat o výstavbě nové kompostárny poblíž města Tábor, kde je koncentrována produkce BRKO. Výsledky simulace lze považovat za horní hranici nákladů pro obce při naplnění scénáře výrazného zvýšení produkce BRKO v horizontu 5–10 let. Tato případová studia byla publikována v (Šomplák et al., 2018b).

5.2 Intenzita dopravy při svozu odpadu do plánovaného ZEVO v Plané nad Lužnicí

Další možností využití svozové úlohy na nižší úrovni detailu v reálné studii je posouzení intenzity dopravy při změně zpracovatelského zařízení. Cílem bylo provést rozbor dopravního zatížení vzhledem k plánované výstavbě ZEVO v lokalitě Planá nad Lužnicí. Lokalizace ZEVO je plánována v areálu teplárny, přičemž posuzována byla varianta kapacity 50 kt/r. ORP Tábor a blízká ORP v současnosti využívají jako koncová zařízení prioritně skládky, přičemž největší je skládka Želeč u Tábora, na kterou je každoročně uloženo cca 30 kt odpadu.

Roční potenciální návoz do ZEVO byl stanoven na cca 49 kt, kde přibližně 55 % množství odpadu je přímý návoz z ORP Tábor, zbylý návoz je predikován z okolních ORP, tj. Milevsko, Soběslav, Votice, Pacov a Týn nad Vltavou. Množství odpadu pro denní návoz je uvažováno 191 t pro kalendářní rok s 52 týdny s pěti pracovními dny. Posuzované území bylo rozděleno na úroveň obcí (celkově 78 obcí a město Tábor bylo rozděleno na 15 menších částí).

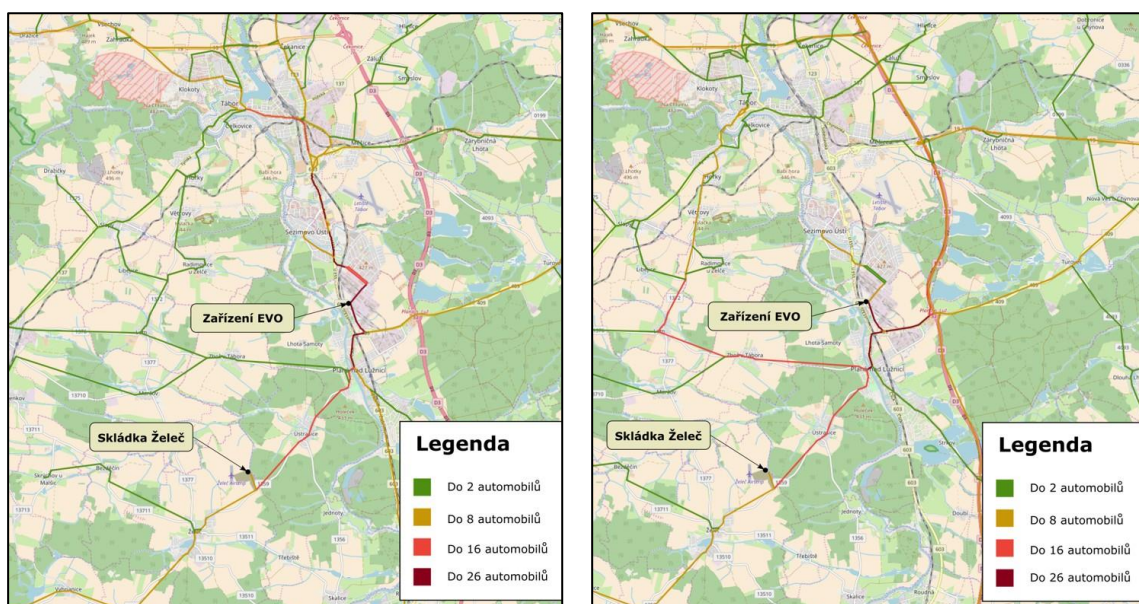
Pomocí aplikace WTM byl vytvořen detailní dopravní model území ORP Tábor a pro každý uzel reprezentující jednotlivé obce, byly nalezeny nejvhodnější svozové trasy do koncového zařízení. Celkově byla provedena analýza současného stavu – odhad dopravy odpadu na skládku Želeč u Tábora a budoucího stavu – predikce dopravy do ZEVO, Planá nad Lužnicí. Výpočet byl dále dělen do dvou scénářů – dopravní obslužnost z pohledu nejkratší vzdálenosti a dopravní obslužnost s objetím města Tábor (využití dálnice D3). Pro dopravu v rámci ORP Tábor se uvažovaly KUKA vozy s přímým návozem odpadu do koncového zařízení, pro ostatní ORP systém jízdní soupravy s nelisovaným odpadem (např. tahač s návěsem typu *Walking Floor* či jednoduchá jízdní souprava).

U současného stavu v podobě svozu odpadu na skládku jsou nejvíce využívány komunikace v okolí skládky a komunikace s dopravní obslužností ve městě Tábor, Sezimovo Ústí a Plané nad Lužnicí. Při zohlednění nejbližší komunikace, která se nachází v těsné blízkosti skládky, se jedná o denní počet průjezdů až 26 automobilů za den (příjezd i odjezd). Celkem bylo zpracováno 1820 úseků komunikací v systému křižovatka-křižovatka.

Ve scénáři potenciálního ZEVO s kapacitou 50 kt/r, bylo uvažováno i s produkcí značného množství reziduí, cca 14 kt (12,5 kt škváry a 1,5 kt popílku), pro které je nutno

řešit dopravu. Pro účely hodnocení se předpokládá, že škvára je odvážena na skládku Želeč u Tábora a v případě popílku se jedná o skládku nebezpečných odpadů ve Vodňanech (trasa přes Týn nad Vltavou). Nárůst intenzity dopravy lze očekávat především pro hlavní tahy, tj. přes městské komunikace města Tábor, Sezimova Ústí a Plané nad Lužnicí. Teoretický odhad je stanoven na 19 denních příjezdů automobilů do ZEVO.

Scénář č. 1 – nejkratší vzdálenost – dopad na zatížení města Tábor, Sezimova Ústí a Plané nad Lužnicí je zobrazen na obr. 23a), kde je patrné, že největší dopravní zátěž je především na komunikacích č. 00356, č. 409, č. 603 a č. 1359. Lze předpokládat, že v případě využití nejkratších dopravních cest, bude mít největší dopad zvýšení dopravy na území Sezimova Ústí. Po odečtení intenzity dopravy na skládku Želeč u Tábora, lze předpokládat s mírně zvýšenou intenzitou dopravy. Nárůst intenzity dopravy lze očekávat v bezprostřední blízkosti budoucího ZEVO. Dále pak na příjezdové komunikaci z východní části ORP a hlavní komunikaci sloužící pro odvoz reziduí ze ZEVO.



a) Scénář č. 1 - nejkratší trasy do ZEVO

b) Scénář č. 2, využití obchvatu města a D3

Obr. 23 Intenzita dopravy pro oba scénáře

Ve scénáři č. 2 – využití obchvatu města – byly negativní aspekty minimalizovány regulací dopravy. V tomto ohledu byl požadavek kladen na vyhnutí se centru města Tábor a Sezimova Ústí. Trasy byly navrženy v západní oblasti řešeného území přes komunikaci D3 a ve východní oblasti přes komunikaci č. 1376 s nájezdem na komunikaci č. 603 v Plané nad Lužnicí. Z výsledných analýz je patrné, že doprava se rovnoměrně rozděluje na východní a západní část města, což pozitivně ovlivňuje snížení dopravy v Sezimově Ústí. Automobilů navážejících odpad do ZEVO v Plané nad Lužnicí bude celkově 19 (kombinace KUKA vozů a jízdních souprav). Dle provedených analýz, zvýšenou dopravní zatíženost lze předpokládat prioritně na komunikacích č. 19, č. 135, č. 137, č. 00356, č. 409, č. 603, č. 1359, č. 1372, č. 1376 a D3, viz obr. 23b).

Na základě datové sady Ředitelství silnic a dálnic z roku 2016, bylo zjištěno, že lze očekávat pouze minimální zvýšení intenzity dopravy na území ORP Tábor v kontextu realizace nového záměru ZEVO. Ve většině případů je vyhodnoceno navýšení nejvýše do

1 % současné intenzity dopravy na sledovaných komunikacích, pouze u nejbližších komunikací k areálu ZEVO lze očekávat průměrné navýšení v rozmezí 1 až 2 % v kontextu těžkých nákladních vozů. Za problémovou lze považovat komunikaci č. 1372, kde byl zjištěn ve scénáři č. 2 nárůst intenzity dopravy až o 7 %. Toto navýšení je z důvodu charakteru komunikace č. 1372 jako hlavní tepny ve východní části obvodu města Tábor.

5.3 Zhodnocení a optimalizace svozových plánů pro větší město – plasty

Tato případová studie ukáže aplikovatelnost teoreticky navržených přístupů na konkrétním svozovém plánu pro větší město s populací okolo 175 tisíc obyvatel, přičemž se bude soustřeďovat pouze na jednu frakci odpadu – plast. Plastový odpad byl vybrán pro vyhodnocení z důvodu dostupnosti historických dat a širokých možností změn svozových plánů (hustota sběrných míst není tak velká jako u SKO, kde musí být obsloužen téměř každý úsek v rámci infrastruktury města).

5.3.1 Předpoklady a vstupní parametry výpočtů

V rámci výpočtu je klíčový výběr sběrných nádob, které budou zavedeny do infrastruktury. Výběr proběhl na základě filtrování dostupných dat podle několika kritérií – byly uvažovány pouze sběrné nádoby s aktuálně otevřeným kontraktem (ad hoc svozy tak nejsou zahrnuty). U sběrných nádob s frekvencí obsluhy jednou za čtrnáct dní byla pro zjednodušení výpočtu navýšena frekvence na každý týden (tímto bylo předem jakékoliv získané řešení zhoršeno – vícenáklady oproti reálnému svozu). Aplikované zjednodušení se však netýká mnoha sběrných nádob.

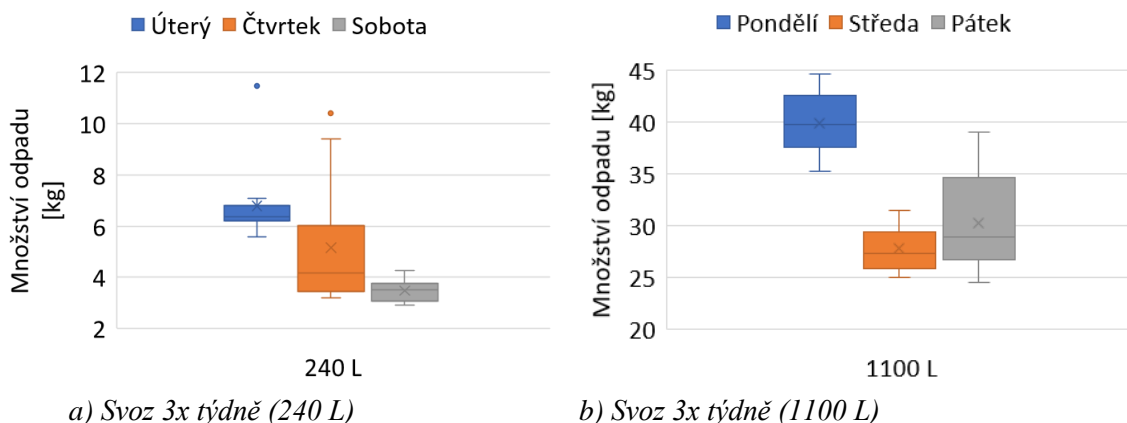
Z reálného svozu odpadu byla obsluha sběrných nádob nastavena na šest dní v týdnu, tj. pondělí až sobota. Doba pro vyprázdnění auta na určeném místě je zvolena na 15 minut, přičemž vývoz je situován na sběrné středisko. Začátek a konec svozu je požadován pro všechna vozidla v místě depa. Lokace těchto míst v rámci města je znázorněna na obr. 24.



Obr. 24 Lokace depa (bod A) a sběrného střediska (bod B) v rámci města

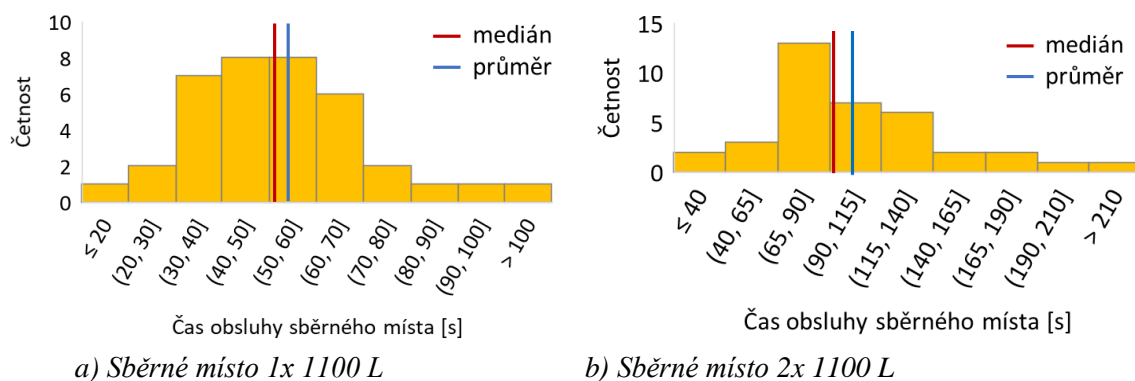
Další důležité vstupní parametry byly získány na základě zpracování historických dat z monitoringu svozu (aplikace přístupů popsaných v předchozích kapitolách). Naplněnost jednotlivých sběrných nádob byla počítána podle koeficientů z různých svozů, ve kterých

byla zahrnuta daná nádoba. Koeficienty vyjadřují průměrné rozložení odpadu na jednotku objemu ve všech sběrných nádobách dané svozové trasy, a to na základě celkového objemu všech nádob a vážicího lístku daného svozu. Z takto získaných koeficientů je následně možné pro každou sběrnou nádobu odhadnout naplněnost v kilogramech (pro robustnější výsledky je možné také vzít vhodný percentil). V případě nedostupnosti historických dat pro některou sběrnou nádobu, je využitý průměr z předchozích svozů podle typu, resp. kapacity sběrné nádoby (1100 L, 240 L apod.). Ukázkové množství odpadu je pro různé velikosti sběrných nádob na obr. 25. V průběhu analýzy byla zjištěna velká variabilita v datech, proto byl proveden detailnější rozbor s ohledem na den svozu. Výsledkem bylo zjištění, že se množství odpadu významně liší podle dne svozu. Z pravidla je v prvních dnech týdne (pondělí, úterý) ve sběrných nádobách více odpadu, což je pravděpodobně způsobeno akumulací přes víkendy, kdy je převážná část populace doma. Různé hodnoty naplněnosti sběrných nádob byly vyhodnoceny i pomocí testování statistických hypotéz. Hypotéza o rovnosti středních hodnot množství odpadu byla na hladině významnosti 0,05 ve většině případů zamítnuta. V dalších výpočtech bude však využita konstantní hodnota pro všechny svozové dny. Úprava modelu a algoritmu pro zohlednění vývoje naplněnosti v průběhu týdne je tak impulz pro další vývoj a výzkum.

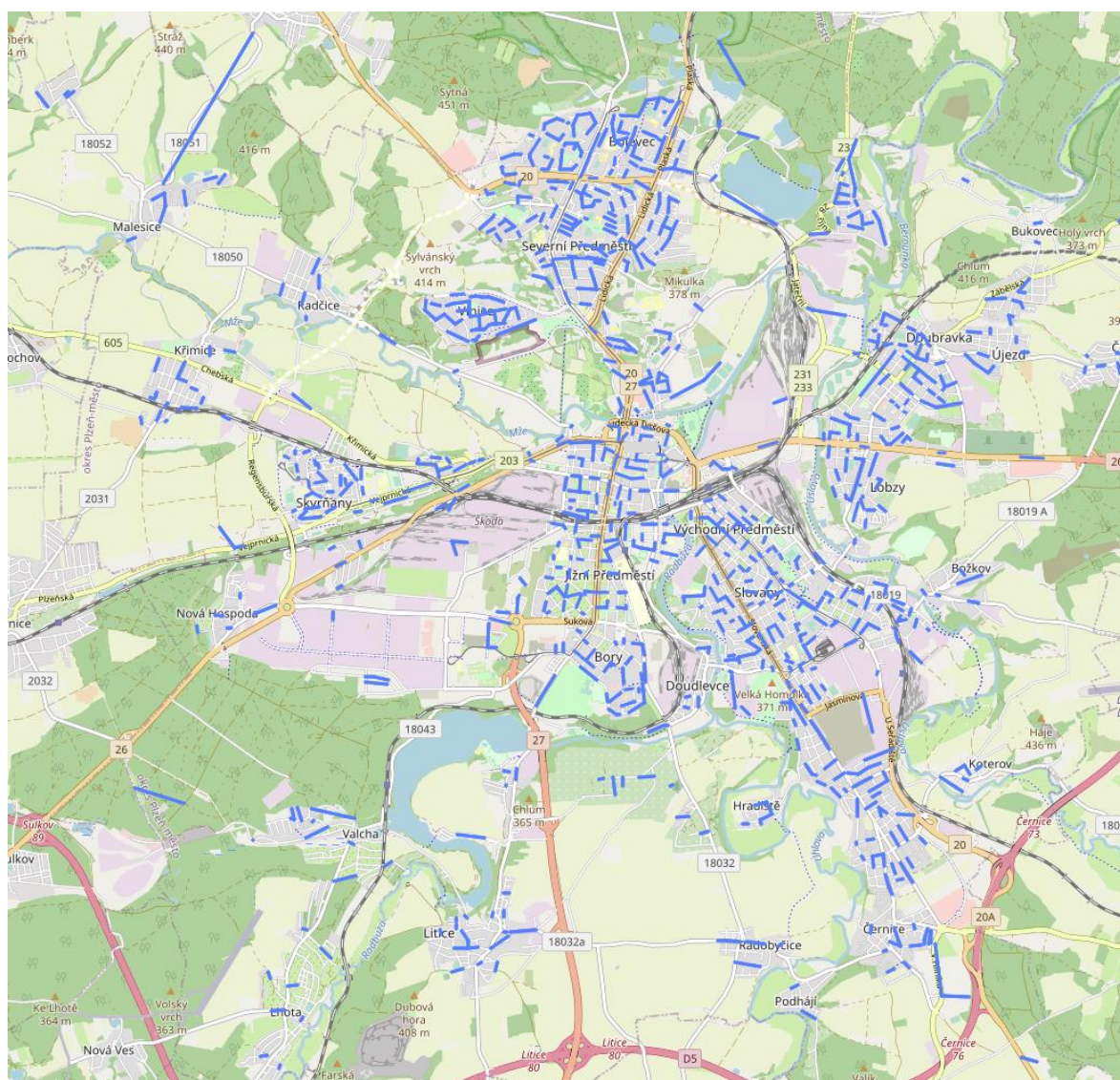


Obr. 25 Krabicové grafy naplněnosti pro různé dny obsluhy sběrných nádob

Doba obsluhy sběrného místa je odhadována podobným způsobem jako naplněnost. V monitoringu byla dostupná data o obsluze jednotlivých míst, tyto údaje jsou pak využity pro výpočet doby strávené na sběrném místě (oproti naplněnosti jsou zde údaje dostupné pro sběrná místa, která často zahrnují několik sběrných nádob). Variabilita doby obsluhy sběrného místa je znázorněna na obr. 26 v histogramech pro různý počet alokovaných sběrných nádob. Z grafu je patrné, že data obsahují extrémní hodnoty, které byly zřejmě způsobeny chybným záznamem. Doba obsluhy je zároveň zatížena velkým rozptylem (směrodatné odchylky odpovídají hodnotám 27,8 a 50,8 pro případ a) resp. b)) což může být způsobeno komplikacemi v průběhu samotného výsypu. Ve výpočtu jsou uvažované mediánové hodnoty, protože průměry jsou více zatíženy extrémny. V další části pre-processingu probíhá agregace těchto dat pro jednotlivé úseky sběrné infrastruktury. Identifikované úseky jsou zobrazeny v mapě na obr. 27.



Obr. 26 Histogramy doby obsluhy sběrných míst



Obr. 27 Segmenty infrastruktury uvažované ve výpočtu

Rychlost vozidla je stanovena pro dva základní způsoby přepravy, tj.

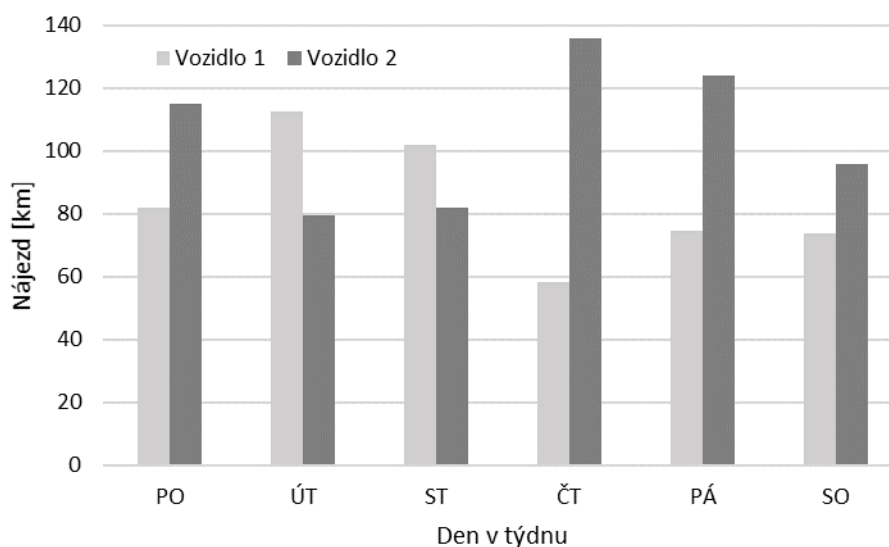
- při obsluze sběrných nádob – přeježdí-li se úsek mezi dvěma křižovatkami, kde se nachází alespoň jeden kontejner k obsluze – 15 km/h,
- při přejezdech – přejezdy mezi úseky k obsluze – 30 km/h.

Provozní doba vozidel je pro každý den stanovena na 8,5 hod, přičemž 0,5 hod je vyhrazeno pro přestávku na oběd.

Pro detailnější srovnání bylo zvoleno období 13 týdnů, ze kterého jsou využita historická data. V tomto období byl analyzován vozový park využitý pro svoz plastů. Jednalo se o dvě vozidla každý den, přičemž jejich kapacita byla stanovena expertně na základě hodnot okolo maxima z předchozích svozů na 4500 kg a 3000 kg. V jednom týdnu je podle svozového plánu k obsluze celkem 1155 ks sběrných nádob, přičemž celkem k obsluze při zohlednění frekvence jednotlivých nádob je to potom 2755 ks.

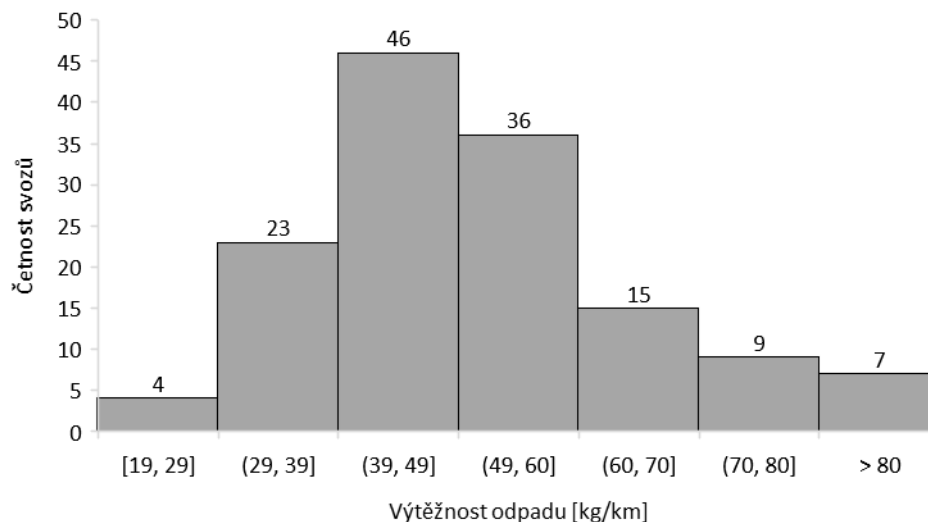
5.3.2 Posouzení reálných svozů

Ze zvoleného období byl vybrán jeden svozový týden pro detailnější posouzení zaznamenaných údajů. Celkově ujetá vzdálenost (1 135 245 m) je počítána jako součet záznamů z celého týdne pro využitá vozidla. Ve zvoleném týdnu probíhal svoz 10 různými vozidly, která celkem provedla 12 výjezdů. Podle vážících záznamů bylo svezeno 47 090 kg plastu. V každém svozovém dni pak dané vozidlo provedlo 1 až 2 výsypy na sběrném dvoře. Na obr. 28 je znázorněna ujetá vzdálenost pro jednotlivé dny. Nájezdy se pohybují v rozmezí od cca 60 do 140 km.



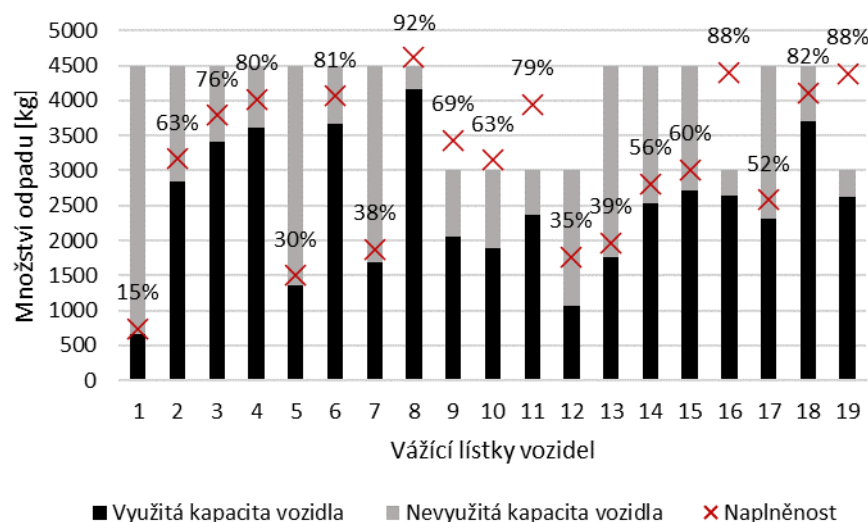
Obr. 28 Nájezd vozidel ve zvoleném svozovém týdnu

Srovnání svozů všech vozidel v celém období 13 týdnů, kde byla dostupná data (odstraněno i několik odlehlých hodnot v podobě celkové váhy sesbíraného odpadu), je znázorněno na obr. 29 z pohledu výtěžnosti odpadu na ujetý kilometr. V průměru se vysbírá okolo 53 kg/km, u svozů nad 80 kg/km se jedná pravděpodobně o další odlehlé hodnoty (chyba na straně nájezdu kilometrů nebo záznam o hmotnosti sesbíraného odpadu).



Obr. 29 Histogram efektivity svozů plastového odpadu v analyzovaném období

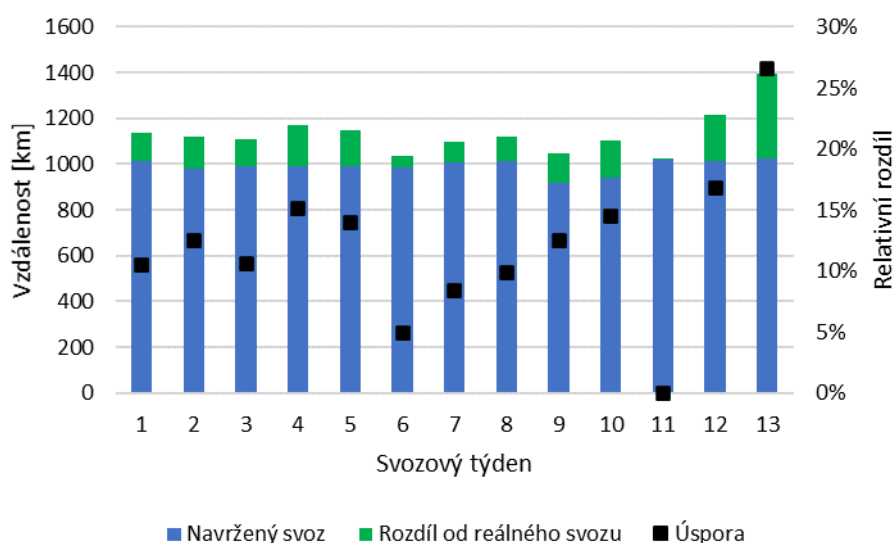
Pro vybraný týden svozu bylo dále vyhodnoceno využití kapacit vozidel (obr. 30). Podle typu vozidla byla odhadnuta naplněnost pro všechny dostupné vážící lístky, kterých je celkem 19. Průměrná naplněnost v rámci tohoto týdne pak dosahovala pouze 62,5 %. Na základě zaznamenaných údajů bylo oproti plánu v tomto týdnu obslouženo 94,87 % sběrných nádob. Řešením je také analyzovat možnost zrychlení svozu – např. vícečlenná osádka – úspora času umožní absolvovat delší trasu a zvýšit naplněnost. Nevyužitá kapacita se tak zdají být nepotřebné, což nabízí otázku, zda by nebylo efektivnější využít pro svoz vozidla s menší kapacitou (nižší hmotnost soupravy a typ vozidla pak povede k menší spotřebě pohonných hmot).



Obr. 30 Využití kapacit vozidel pro jednotlivé svozové trasy

5.3.3 Optimalizace historických svozů

Všechna dostupná historická data v předmětném období byla využita pro vytvoření startovacích řešení. V prvním kroku byla tedy optimalizace provedena pro každý týden. Výsledkem je možnost srovnání reálných svozů z historických dat s nově upravenými trasami. Srovnání je pro všech 13 analyzovaných týdnů znázorněno na obr. 31.



Obr. 31 Srovnání reálného a navrženého svozu

Celková teoretická úspora v tomto období činí 1834 km (cca 141 km za týden), což odpovídá přibližně 12,5 % z reálně ujeté vzdálenosti. V případě dosažení této hodnoty po dobu celého roku může úspora činit při uvažování nákladů 20 Kč/km až 146 000 Kč. Další potenciální úspora může být z důvodu využití menších vozidel, které mají z pravidla nižší provozní náklady (více bylo toto téma rozebíráno v dizertační práci Gregor (2018)). Tento postup může být využit pro všechny separátně svážené frakce (papír, sklo, bioodpad, textil), což může vést k dalším úsporám pohonných hmot a prostředků svozové firmy nebo technických služeb.

Výše zmíněný postup však nectí svozový plán, ve kterém je definována frekvence svozu, resp. dny kdy mají být sběrné nádoby obslouženy. Všechny historické svozy byly tedy dále využity k doplnění informací o sběrných nádobách, které mají být podle plánu obslouženy. Výstupem je pak 13 startovacích řešení, která vstupují do heuristického algoritmu. V průběhu optimalizace byly nalezeny stovky přípustných řešení týdenního svozu, z čehož byly vybrány dvě nejlepší (Řešení 1 a 2). Detaily těchto svozů a všech reálných svozů jsou uvedeny v tab. 6. Nejlepší nalezené řešení je i přes svezení více sběrných nádob lepší než 7 reálných týdnů. Vzhledem k poddimenzování maximální kapacity vozidel by i při větším množství odpadu ve sběrných nádobách nemělo docházet k přeplnění vozidel (konkrétní analýzy nejsou prezentovány).

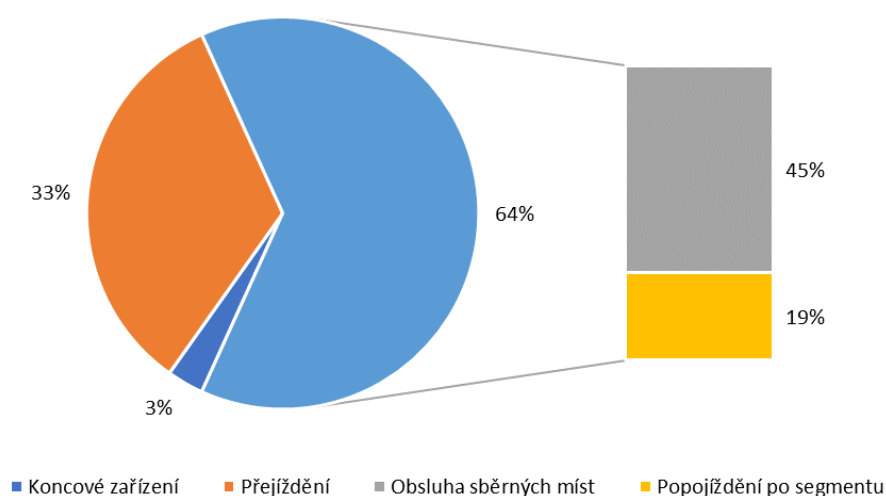
Tab. 6 Parametry nově navržených svozových tras pro týdenní horizont a data z monitoringu

	Nájezd [km]	Celkem odpadu [kg]	Celkem obslouženo nádob [%]
Řešení 1	1116	46 722	100,0
Řešení 2	1130	46 722	100,0
Týden 1	1135	47 090	94,8
Týden 2	1121	61 180	94,4
Týden 3	1109	70 470	94,5
Týden 4	1170	47 540	94,5
Týden 5	1151	52 560	93,9
Týden 6	1036	49 250	94,2
Týden 7	1098	51 590	95,1
Týden 8	1123	60 020	93,9
Týden 9	1050	57 660	93,7

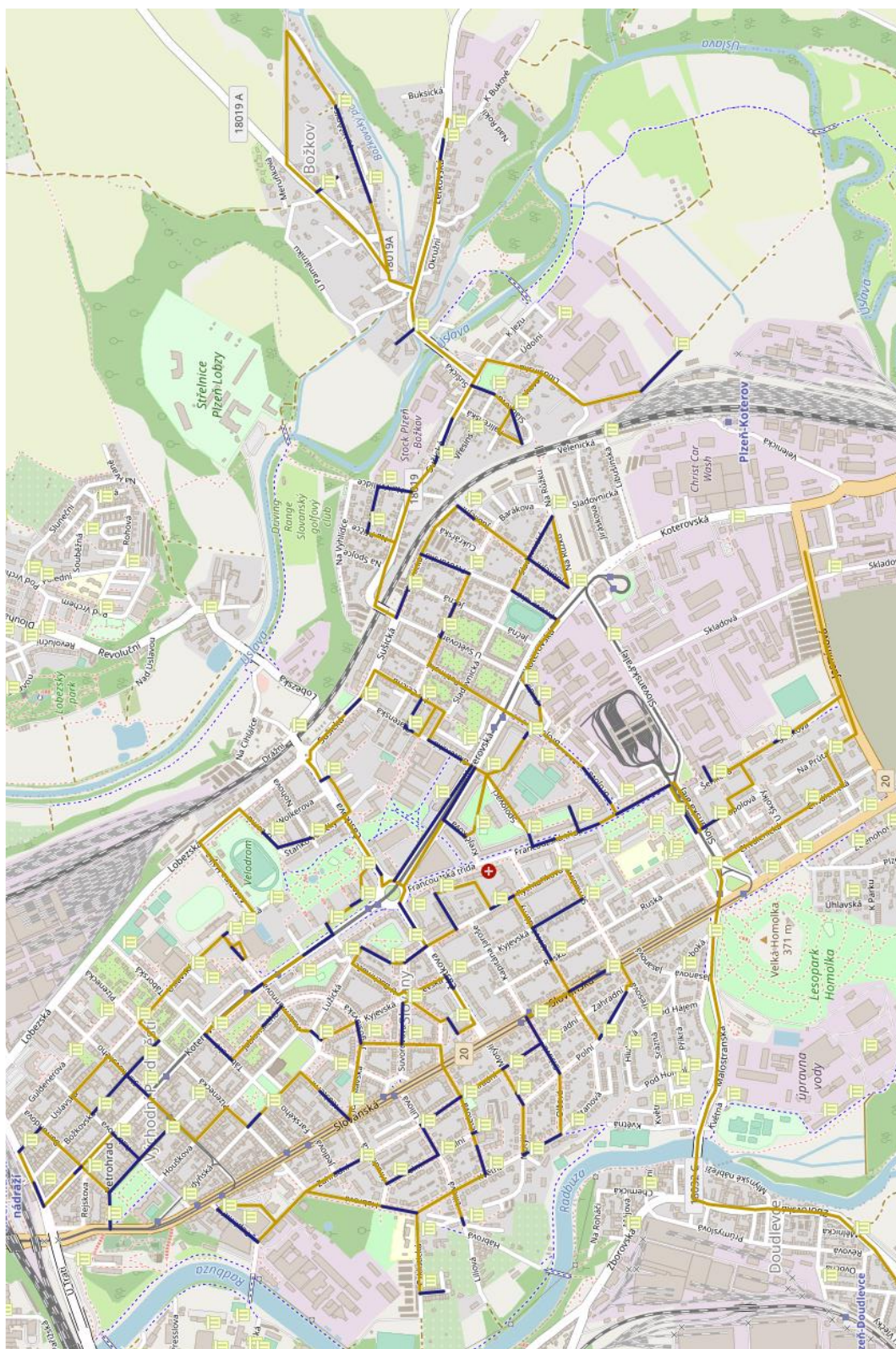
	Nájezd [km]	Celkem odpadu [kg]	Celkem obslouženo nádob [%]
Týden 10	1103	56 320	94,5
Týden 11	1021	59,330	95,6
Týden 12	1216	*44,250	94,0
Týden 13	1396	*6,190	93,1

* v daném týdnu nejsou dostupná data ke všem vážícím lístkům

Pro lepší představu o rozdělení provozní doby vozidla byla týdenní data z řešení 1 agregována a rozdělena do několika činností (obr. 32). Z grafu je vidět, že téměř polovina času souvisí s vlastní obsluhou sběrných nádob. Přibližně polovinu času je pak vozidlo v pohybu, a to buď v rámci přejíždění mezi segmenty se sběrnými místy nebo popojíždění při sběru. Rychlost vozidla na různých částech infrastruktury má tak veliký vliv na celkovou dobu v provozu. Ukázka navržené svozové trasy je na obr. 33



Obr. 32 Distribuce pracovní doby – agregovaná data za týden



Obr. 33 Středniční svozová trasa pro vozidlo 1

Podobné výpočty lze provádět s různými vstupními daty a zkoumat tak citlivost na změny. Tímto postupem se docílí nalezení nejvhodnějších svozových tras, které budou zároveň schopné reagovat na neočekávané změny. Představenou studii lze aplikovat i na další typy separátně sbíraných odpadů.

6 ZÁVĚR A NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU

V oblasti odpadového hospodářství (OH) je stále prostor pro zlepšování efektivity celého systému. O to víc v současné době, kdy je velký rozmach nových technologií, které mohou být zakomponovány do procesu. S nárůstem politického tlaku a v návaznosti legislativních změn se zvětšuje nutnost využití inteligentnějších konceptů, které splní nastavené požadavky a cíle.

Zmíněná změna se promítá i do sektoru sběru a svozu odpadu. Dopravní náklady hrají významnou roli v celkovém rozpočtu měst pro nakládání s KO. Svoz může činit až polovinu celkových nákladů (Das a Bhattacharyya (2015) uvádí 50 až 70 % pro Indii). Z největší části se jedná o svoz separátně tříděných složek, a to z důvodu jejich nízké sytné hmotnosti a velké prostorové distribuci v rámci města (polohy sběrných míst jsou navrženy s ohledem na rozumné pokrytí obyvatelstva). Tyto náklady budou dále narůstat s ohledem na trend směřující k cirkulární ekonomice, která má za cíl zvyšovat míru separace a recyklace. Jedním ze směrů, který lze očekávat, pro dosažení tohoto cíle je intenzifikace systému sběrů, a to kvantitativní (občané více třídí) nebo kvalitativní (navyšováním počtu odděleně sbíraných frakcí).

Pro efektivní implementaci a plnění těchto cílů je potřeba disponovat sofistikovaným nástrojem pro podporu plánování v oblasti logistiky odpadu na mikroregionální úrovni. Úlohy z této oblasti spadají nejčastěji do oblasti operačního výzkumu. Ovšem s ohledem na jejich složitost, která je dána hlavně kombinatorickými možnostmi problému, je nutné přistoupit k heuristickému přístupu. Úlohy jsou náročné také z pohledu vstupních dat, proto je potřeba provádět důkladný pre-processing a statistické vyhodnocení. Aby úlohy spojené se svozem, dimenzováním vozového parku, rozmístěním sběrných nádob a celkovým vyhodnocením ekonomiky a dopadu na životní prostředí věrohodně modelovaly reálnou situaci, musí splňovat požadavky z provozu. Výsledky definovaných úloh mají za cíl podpořit rozhodování v oblasti investic a realizace záměrů, a to především s minimalizací nákladů, dopadu na obyvatelstvo a s ohledem na životní prostředí.

Dizertační práce shrnula vývoj v oblasti logistiky odpadu za poslední období. Byla představena rozsáhlá rešerše svozových úloh, distribučních a lokačních problémů, síťových a alokačních úloh, systémů sběru a možností v rámci modelování problémů OH. Na základě této literatury byly identifikovány výzvy týkající se reálných úloh a jejich implementace do logistických systémů. Základní atributy a součásti pokročilého optimalizačního nástroje jsou:

- dopravní síť, její konstrukce a integrace silničních pravidel,
- sběrné nádoby, jejich vlastnosti, rozmístění a napojení na infrastrukturu,
- algoritmus, jeho vstupní parametry, výchozí model a implementace,
- kritéria výpočtu a okrajové podmínky definované úlohy,
- analýza výsledků, zahrnující efektivitu, robustnost, emise a ekonomiku,
- vizualizace výsledků.

V práci a souvisejících článcích byly představeny dílčí algoritmy, které umožní praktickou aplikovatelnost nástrojů. Přístupy slouží především pro přípravu vstupních dat souvisejících s infrastrukturou a sítí rozmístění sběrných nádob. Pro zvolený přístup byl navržen způsob párování sběrných nádob s dopravní sítí, který navíc redukuje velikost výsledné úlohy. Dále byl popsán vícekritériální postup pro návrh sběrných míst pro nové typy odpadu. Pro definování vzdáleností mezi hranami sběrné sítě byl navržen algoritmus,

který zohledňuje zákaz průjezdu pro některých komunikacích či směrech pomocí penalizační funkce. Pro zachování požadované frekvence svozu byly definovány imaginární hrany. Environmentální kritéria byla implementována do účelových funkcí a modelů k vyhodnocení globálních a lokálních dopadů. Jednotlivé vstupní parametry týkající se času obsluhy a naplněnosti sběrných nádob jsou rozpracovány do většího detailu. Velikým přínosem je také algoritmus generující inicializační řešení z historických svozů. Vznikl tak ucelený soubor postupů, které mají význam pro praxi. Výstupy přispívají k realizaci projektů a plánování v oblasti OH. Praktické aplikace mají současně originální prvky pro výzkum.

Závěrečná část se zabývala také pilotními případovými studiemi, které prověřují praktickou aplikovatelnost některých z ukázaných postupů. Konkrétně se jednalo o odhad nákladů na svoz a sběr BRKO pro ORP Tábor. Dále pak byla odhadována intenzita dopravy při svozu odpadu do plánovaného ZEVO v Plané nad Lužnicí. Výsledky výpočtu byly využity ve studii proveditelnosti zmiňovaného zařízení a v rozptylové studii.

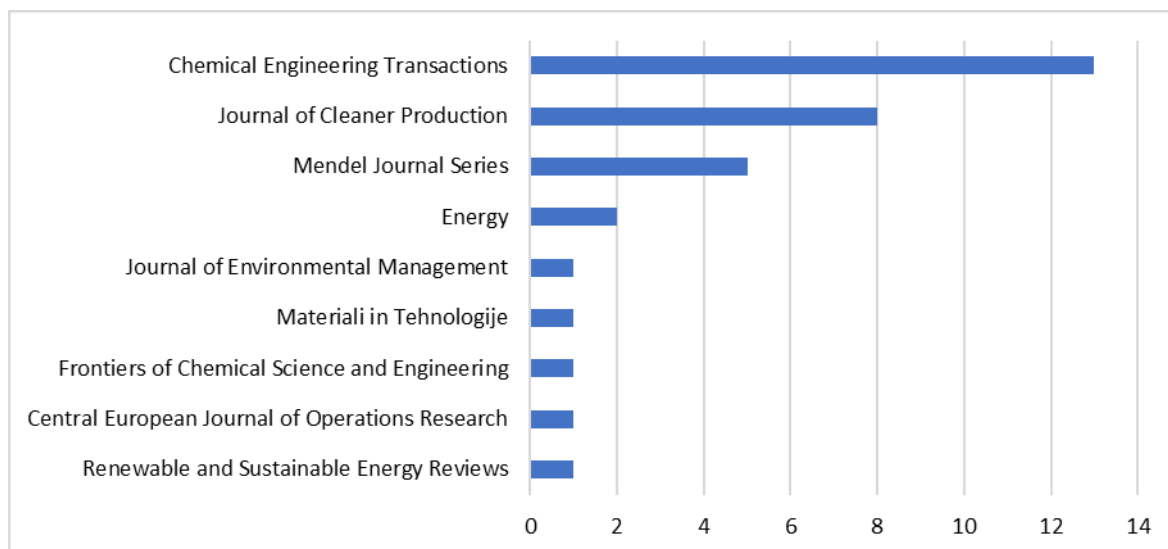
Závěrečnou případovou studií je zhodnocení a optimalizace svozových tras pro separátně sbíraný plastový odpad pro vybrané větší město. Zde byl aplikován algoritmus pro vytvoření inicializačních řešení, které jsou sestaveny z historických dat, a nadále vstupují do samotného heuristického algoritmu. Detailněji zde také byla analyzována historická data týkající se času na obsluhu sběrných nádob a jejich naplněnosti. Výsledky sloužily jako vstupy do vlastní optimalizace. Na základě zhodnocení plánu svozových tras a výsledků je doporučeno změnit alokaci typu vozidel pro některé svozové dny nebo trasy. Tím by mohlo dojít k úspoře provozních nákladů. Dále byly historické svozy srovnány s nově navrženými řešeními, přičemž pro 13 analyzovaných týdnů byla vypočítána teoretická úspora 12 % z reálně najeté vzdálenosti (cca 141 km/týden).

Výsledky práce současně definují nové výzkumné úkoly, které mohou přispět k dalšímu rozvoji vytvořených nástrojů. Další výzkum by měl být směřován k uvažování variabilní naplněnosti sběrných nádob, jelikož bylo prokázáno, že se množství odpadu v kontejnerech významně liší mezi jednotlivými svozy v průběhu týdne. Jinou možností může být návrh změny svozových dnů tak, aby bylo množství odpadu rovnoměrnější. Vývoj by se měl také zabývat body z kapitoly 2.6, jež vyplívají z požadavků z praxe a nebyly detailněji řešeny v této práci.

Vzhledem k současnému trendu zakládání dobrovolných svazků obcí a pořizování vlastních svozových vozidel, vzniká potřeba plánování nových svozových tras. Úpravu stávajících svozových tras je nutné řešit také při rozšiřování svazků o nové členy. Je nutné posoudit, jaký dopad bude mít obsluha další obce na časové a kapacitní možnosti vozidel. Výběr nových členů musí být také efektivní z ekonomického pohledu (zvýšené náklady, možnost rozpočítávání nákladů na jednotlivé obce). Tento druh úlohy vede na kombinaci teorie her s VRP nebo heuristický přístup pro separátní řešení těchto problémů s následnou kombinací výsledků. Těmito tématy se bude autor dále zabývat prostřednictvím vedení závěrečných prací a výzkumných projektů.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

H-index: 6 (5 bez autocitací), citace: 129 (80 bez autocitací), počet článků v databázi SCOPUS: 33, z toho v časopisech s impakt faktorem: 15. Stav k 3.9.2020.



Národní

2019

1. Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Gregor J. 2019. Posouzení a návrh svozových plánů odpadu. In *Sborník konference*. Praha: CEMC, 1-6. ISBN: 978-80-85990-30-0.

2018

2. Gregor J., Pavlas M., Kropáč J., Nevrlý V. 2018. Hodnocení nákladů různých cest svozu a odvozu separovaných složek. *Odpady*, 07, 25-26. ISSN: 1210-4922.
3. Nevrlý V., Šomplák R., Gregor J. 2018. Prognóza produkce BRKO a nákladů na jeho sběr a svoz. *Odpadové fórum*, 19, 5, 30-31. ISSN: 1212-7779.
4. Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Jadrný J. 2018. Prognóza produkce biologicky rozložitelného komunálního odpadu v ČR. In *Sborník konference*. Praha: CEMC, 1-6. ISBN: 978-80-85990-30-0.

2017

5. Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Szásziová L. 2017. Odhad způsobu nakládání se spalitelnými odpady a jejich toků v ČR v roce 2015. *Sborník konference CHISA 2017*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 60-60.
6. Šomplák R., Szásziová L., Smejkalová V., Nevrlý V., Málek M., Pavlas M. 2017. Současné toky a zpracování spalitelných odpadů v ČR. In *Sborník konference*. Praha: CEMC, 1-10. ISBN: 978-80-85990-30-0.

Mezinárodní

2021

1. Nevrlý V., Šomplák R., Smejkalová V., Lipovský T., Jadrný J. 2021. Location of Municipal Waste Containers: Trade-off Between Criteria. *Journal of Cleaner Production*, 278, 1-13, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123445.

2. Pluskal J., Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Pavlas M. 2021. Strategic decisions leading to sustainable waste management: Separation, sorting and recycling possibilities. *Journal of Cleaner Production*, 278, 1-16, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123359.

2020

3. Hrubý P., Kalina L., Másilko J., Pořízka J., Šoukal F., Nevrlý V., Kimm M., Gries T. 2020. Stability of Basalt-fibres reinforcement in Alkali-activated systems. *Materiali in tehnologije*, 54, 2, 203-210, DOI: 10.17222/mit.2019.151.
4. Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Burcin B., Kučera T. 2020. Trend forecasting for waste generation with structural break. *Journal of Cleaner Production*, 266, 1, 1-16, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121814.
5. Hrabec D., Šomplák R., Nevrlý V., Viktorín A., Pluháček M., Popela P. 2020. Sustainable waste-to-energy facility location: Influence of demand on energy sales. *Energy*, 207, 1-15, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118257.
6. Kůdela J., Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V. 2020. Legislation-induced planning of waste processing infrastructure: A case study of the Czech Republic. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 132, 1-14, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110058.

2019

7. Šomplák R., Pavlas M., Nevrlý V., Touš M., Popela P. 2019. Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1294-1303, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.165.
8. Kůdela J., Šomplák R., Nevrlý V., Lipovský T., Smejkalová V., Dobrovský L. Multi-objective strategic waste transfer station planning. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230, 1, 1294-1304, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.167.
9. Hrabec D., Kůdela J., Šomplák R., Nevrlý V., Popela P. 2019. Circular economy implementation in waste management network design problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 1, 1, 1-18, DOI: 10.1007/s10100-019-00626-z.
10. Nevrlý V., Šomplák R., Putna O., Pavlas M. 2019. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 239, 1, 1-11, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118003.
11. Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Šmídová Z., Pavlas M. 2019. Bulky Waste for Energy Recovery: Analysis of Spatial Distribution. *Energy*, 181, 1, 827-839, DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.175.
12. Šomplák R., Kůdela J., Smejkalová V., Nevrlý V., Hrabec D., Pavlas M. 2019. Pricing and Advertising Strategies in Conceptual Waste Management Planning. *Journal of Cleaner Production*, 239, 1, 1-12, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118068.
13. Nevrlý V., Šomplák R., Popela P. 2019. Heuristics for Waste Collection Arc Routing Problem. *Mendel Journal series*, 25, 1, 15-22, DOI: 10.13164/mendel.2019.1.015.
14. Kůdela J., Šomplák R., Nevrlý V. 2019. Strategic Multi-Stage Planning of Waste Processing Infrastructure. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1, 1261-1266, DOI: 10.3303/CET1976211.
15. Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Holec T. 2019. Forecasting of Waste Production Data with Changes in Credibility and Trend. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1, 1243-1248, DOI: 10.3303/CET1976208.

16. Šomplák R., Smejkalová V., Nevrlý V., Pluskal J., Pavlas M. 2019. Implementation of Circular Economy through the Mathematical Programming for the Complex System Evaluation. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1, 523-528, DOI: 10.3303/CET1976088.
17. Nevrlý V., Šomplák R., Khýr L., Smejkalová V., Jadrný J. 2019. Municipal Solid Waste Container Location Based on Walking Distance and Distribution of Population. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 553-558, DOI: 10.3303/CET1976093.
18. Hrabec D., Senland P., Nevrlý V., Popela P., Hoff A., Šomplák R., Pavlas M. 2019. Quantity-Predictive Vehicle Routing Problem for Smart Waste Collection. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1249-1254, DOI: 10.3303/CET1976209.
19. Nevrlý V., Šomplák R., Smejkalová V. 2019. Saving of GHG by modifying schedule of waste collection routes. In *Proceedings Sardinia 2019, 17th International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA, 1-10. ISBN: 9788862650144. ISSN: 2282-0027.

2018

20. Nevrlý V., Šomplák R., Gregor J., Pavlas M., Klemeš J.J. 2018. Impact assessment of pollutants from waste-related operations as a feature of holistic logistic tool. *Journal of Environmental Management*, 220, 77-86, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.003.
21. Nevrlý V., Šomplák R., Pavlas M., Klemeš J.J. 2018. Waste Transportation and Facility Location Based on Cost and Impact of Emissions. In: *Proceedings of 13th SDEWES Conference, Zagreb, Croatia*, 1-7, ISSN: 1847-7178.
22. Pavlas M., Nevrlý V., Putna O., Šomplák R. 2018. Cost of reducing greenhouse gas emissions from residual municipal waste treatment. In: *Proceedings of 13th SDEWES Conference, Zagreb, Croatia*, 1-9, ISSN: 1847-7178.
23. Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Pavlas M. 2018. Design and Decomposition of Waste Prognostic Model with Hierarchical Structures. *Mendel Journal series*, 1, 85-92. ISSN: 1803-3814.
24. Kůdela J., Šomplák R., Nevrlý V., Lipovský T. 2018. Robust waste transfer station planning by stochastic programming. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 889-894, DOI: 10.3303/CET1870149.
25. Šomplák R., Nevrlý V., Šmídová Z., Pavlas M. 2018. Multi-objective waste network flow identification model based on economic and environmental aspects. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1627-1632, DOI: 10.3303/CET1870272.
26. Hrabec D., Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V. 2018. Sustainable model integration of waste production and treatment process based on assessment of GHG. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1603-1608. DOI: 10.3303/CET1870268.
27. Ferdan T., Pavlas M., Nevrlý V., Šomplák R., Stehlík P. 2018. Greenhouse Gas Emissions from Thermal Treatment of Non-Recyclable Municipal Waste. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12, 4, 815-831, DOI: 10.1007/s11705-018-1761-4.

2017

28. Pavlas M., Šomplák R., Smejkalová V., Nevrlý V., Zavíralová L., Kůdela J., Popela P. 2017. Spatially distributed production data for supply chain models - Forecasting with hazardous waste. *Journal of Cleaner Production*, 161, 1317-1328, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.107.

29. Nevrlý V., Šomplák R., Gregor J., Pavlas M., Klemeš J.J. 2017. Impact on the Population from the Transportation of Waste based on Emission Models. Proceedings of 12th SDEWES Conference, Zagreb, Croatia, 1-14. ISSN: 1847-7178.
30. Šomplák R., Zavíralová L., Pavlas M., Nevrlý V., Popela P. 2017. Input data validation for complex supply chain models applied to waste management. Chemical Engineering Transactions, 56, 1921-1926. DOI: 10.3303/CET1756321.
31. Šomplák R., Nevrlý V., Málek M., Pavlas M., Klemeš J.J. 2017. Network flow based model applied to sources, sinks and optimal transport of combustible Waste. Chemical Engineering Transactions, 61, 991-996. DOI: 10.3303/CET1761163.
32. Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Pavlas M., Kudela J. 2017. Verification of information in large databases by mathematical programming in waste management. Chemical Engineering Transactions, 61, 985-990. DOI: 10.3303/CET1761162.
33. Hrabec D., Šomplák R., Nevrlý V., Janošák F., Rosecký M., Kudela J. 2017. Robust facility location problem for bio-waste transportation. Chemical Engineering Transactions, 61, 1093-1098. DOI: 10.3303/CET1761180.
34. Ferdan T., Pavlas M., Šomplák R., Nevrlý V., Klemeš J.J., Pitschke T. 2017. Allocation analysis of waste treatment nodes for economic optimisation considering reduced greenhouse gas emissions. Chemical Engineering Transactions, 61, 967-972. DOI: 10.3303/CET1761159.
35. Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Pavlas M. 2017. Heuristic methodology for forecasting of quantities in waste management. Mendel Journal series, 1, 185-192, ISSN: 1803-3814.
- 2016**
36. Nevrlý V., Šomplák R., Popela P., Pavlas M., Osička O., Kúdela J. 2016. Heuristic challenges for spatially distributed waste production identification problems. Mendel Journal series, 109-116, ISSN: 1803-3814.
- 2015**
37. Pavlas M., Nevrlý V., Popela P., Šomplák R. 2015. Heuristic for generation of waste transportation test networks. Mendel Journal series, 189-194, ISSN: 1803-3814.

LITERATURA

- Agar B.J., Baetz B.W., Wilson B.G. 2007. Fuel Consumption, Emissions Estimation, and Emissions Cost Estimates Using Global Positioning Data. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57, 3, 348–354. DOI: 10.1080/10473289.2007.10465328.
- Akhtar M., Hannan M.A., Begum R.A., Basri H., Scavino E. 2017. Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61, 117–128, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.022.
- Barbosa-Póvoa A.P., da Silva C., Carvalho A. 2018. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research*. 268, 2, 399–431, DOI: 10.1016/j.ejor.2017.10.036.
- Beijoco F., Semião V., Zsigraiová Z. 2010. Optimization Of A Municipal Solid Waste Collection And Transportation System. Dostupné z <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142733883/Paper.pdf>, [22.12.2018].
- Bektaş T., Laporte G. 2011. The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45, 8, 1232–1250, DOI: 10.1016/j.trb.2011.02.004.
- Bing X., Bloemhof J. M., Ramos T. R. P., Barbosa-Povoa A. P., Wong C. Y., van der Vorst J. G. A. J. 2016. Research Challenges in Municipal Solid Waste Logistics Management. *Waste Management*, 48, 584–592, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.025.
- Birge J.R., Louveaux F. 2011. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer: New York, Second Edition, 485, DOI: 10.1007/978-1-4614-0237-4.
- Cattaruzza D., Absi N., Feillet D., Vidal T. 2014. A memetic algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 236, 3, 2014, 833–848, DOI: 10.1016/j.ejor.2013.06.012.
- Clarke G., Wright J. W. 1964. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations research*, 12, 4, 568–581, DOI: 10.1287/opre.12.4.568.
- Das S., Bhattacharyya B.K. 2015. Performance Evaluation of the Proposed and Existing Waste Management System: Economic Analysis. *Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering*, 267–277.
- Dijkstra E.W. 1959. A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, 1, 269–271, DOI: 10.1007/BF01386390.
- Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste (Text with EEA relevance), 100–108.
- Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste, 109–140.
- Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste, 141–154.
- Dror M., Laporte G., Musmanno R., 2000. Arc routing: theory, solutions, and applications. Springer US, 483, DOI: 10.1007/978-1-4615-4495-1.
- Eiselt H.A., Gendreau M., Laporte G. 1995. Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem. *Operations Research*, 43, 2, 231–242. DOI: 10.1287/opre.43.2.231.

Eiselt H.A., Gendreau M., Laporte G. 1995. Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem. *Operations Research*, 43, 3, 399–414, DOI: 10.1287/opre.43.3.399.

Ferreira F., Avelino C., Bentes I., Matos C., Teixeira C.A. 2017. Assessment strategies for municipal selective waste collection schemes. *Waste Management*, 59, 3–13, DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.044.

Ferdan T., Šomplák R., Zavíralová L., Pavlas M., Frýba L. 2015. A Waste-to-Energy Project: A Complex Approach towards the Assessment of Investment Risks. *Applied Thermal Engineering*, 89, 1, 1127–1136, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005.

Ferdan T., Pavlas M., Nevrlý V., Šomplák R., Stehlík P. 2018. Greenhouse Gas Emissions from Thermal Treatment of Non-Recyclable Municipal Waste. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12, 4, 815–831, DOI: 10.1007/s11705-018-1761-4.

Ferdan T., Pavlas M., Šomplák R., Nevrlý V., Klemeš J. J., Pitschke T. 2017. Allocation Analysis of Waste Treatment Nodes for Economic Optimisation Considering Reduced Greenhouse Gas Emissions. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 967–972, DOI: 10.3303/CET1761159.

Floyd R.W. 1962. Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*, 5, 6, 345, DOI:10.1145/367766.368168.

Fu H.-Z., Li Z.-S., Wang R.-H. 2015. Estimating municipal solid waste generation by different activities and various resident groups in five provinces of China, *Waste Management*, 41, 3–11, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.03.029.

Ghiani G., Laganà D., Manni E., Musmanno R., Vigo D. 2014. Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computer & Operations Research*, 44, 22–32, DOI: 10.1016/j.cor.2013.10.006.

Ghiani G., Laganà D., Manni E., Triki C. 2012. Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. *Waste Management*, 32, 7, 1291–1296, DOI: 10.1016/j.wasman.2012.02.009.

Ghiani G., Manni A., Manni E., Toraldo M. 2014. The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management. *Waste Management*, 34, 11, 1949–1956, DOI: 10.1016/j.wasman.2014.05.026.

Ghinea C., Drăgoi E.N., Comăniță E.-D., Gavrilescu M., Câmpian T., Curteanu S., Gavrilescu M. 2016. Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. *Journal of Environmental Management*, 182, 80–93, DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.026.

Glover F. 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13, 5, 533–549, DOI: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.

Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values, 2016. Dostupné z https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf, [22.12.2018].

Gregor J. 2019. Pokročilé modely logistiky v oblasti odpadového hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 180 s., Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

Gregor J., Pavlas M., Šomplák R. 2017. Transportation Cost as an Integral Part of Supply Chain Optimization in the Field of Waste Management. *Chemical Engineering Transactions*, 1927–1932, DOI: 10.3303/CET1756322.

Haupt M., Waser E., Würmli J.C., Hellweg S. 2018. Is there an environmentally optimal separate collection rate?. *Waste Management*, 77, 220–224, DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.050.

Hemmelmayr V., Doerner K.F., Hartl R.F., Rath S. 2013. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. *Journal of Heuristics*, 19, 2, 129–156, DOI: 10.1007/s10732-011-9188-9.

Hemmelmayr V., Doerner K. F., Hartl R. F., Vigo D. 2014. Models and Algorithms for the Integrated Planning of Bin Allocation and Vehicle Routing in Solid Waste Management. *Transportation Science*, 48, 1, 103–120, DOI: 10.1287/trsc.2013.0459.

Henke T., Speranza M.G., Wäscher G. 2018. A branch-and-cut algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *Annals of Operations Research*, 1–18, DOI: 10.1007/s10479-018-2938-4.

Hidalgo D., Martín-Marroquín J.M., Corona F., Juaristi J.L. 2018. Sustainable vacuum waste collection systems in areas of difficult access. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 221–227, DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.026.

Hoff A., Andersson H., Christiansen M., Hasle G., Løkketangen A. 2010. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*, 37, 12, 2041–2061, DOI: 10.1016/j.cor.2010.03.015.

Hrabec D., Senland P., Nevrlý V., Popela P., Hoff A., Šomplák R., Pavlas M. 2019. Quantity-Predictive Vehicle Routing Problem for Smart Waste Collection. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1249–1254, DOI: 10.3303/CET1976209.

Huang S.-H., Lin P.-C., Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy. *Omega*, 55, 24–37, DOI: 10.1016/j.omega.2015.02.004.

Institut pro udržitelný rozvoj měst a obcí, o.p.s. 2016. Hodnocení nákladů na hospodaření s komunálními odpady v obcích ČR (za rok 2015). 82 s., Dostupné z www.institut-urmo.cz/images/Hodnoceni_nakladu_na_hospodaren_s_KO_2015.pdf, [12.12. 2018].

Jaunich M.K., Levis J.W., DeCarolus J.F., Gaston E.V., Barlaz M.A., Bartelt-Hunt S.L., Jones E.G., Hauser L., Jaikumar R. 2016. Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 92–102, DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.07.012.

Jeswani H.K., Azapagic A. 2016. Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK. *Waste Management*, 50, 346–363, DOI: 10.1016/j.wasman.2016.02.010.

Johansson O.M. 2006. The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Management*, 26, 8, 875–885, DOI: 10.1016/j.wasman.2005.09.004.

Khan M.M.-U.-H., Vaezi M., Kumar A. 2018. Optimal siting of solid waste-to-value-added facilities through a GIS-based assessment. *Science of The Total Environment*, 610–611, 1065–1075, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.169.

Koç Ç., Bektaş T., Jabali O., Laporte G. 2014. The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239–254, DOI: 10.1016/j.trb.2014.09.008.

Laporte G. Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, 43, 4, 2009, DOI: 10.1287/trsc.1090.0301.

Laureri F., Minciardi R., Robba M. 2016. An algorithm for the optimal collection of wet waste. *Waste Management*, 48, 56–63, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.020.

Lavee D., Nardiya S. 2013. A cost evaluation method for transferring municipalities to solid waste source-separated system. *Waste Management*, 33, 5, 1064–1072, DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.026.

Leeabai N., Suzuki S., Jiang Q., Dilixiati D., Takahashi F. 2019. The effects of setting conditions of trash bins on waste collection performance and waste separation behaviors; distance from walking path, separated setting, and arrangements. *Waste Management*, 94, 58–67, DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.039.

López-Sánchez A.D., Hernández-Díaz A.G., Gortázar F., Hinojosa M.A. 2018. A multiobjective GRASP–VND algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25, 2, 545–567, DOI: 10.1111/itor.12452.

Lenstra J.K., Kan A.H.G.R. 1976. On general routing problems. *Networks*, 6, 3, 273–280. DOI: 10.1002/net.3230060305.

Miezah K., Obiri-Danso K., Kádár Z., Fei-Baffoe B., Mensah M.Y. 2015. Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. *Waste Management*, 46, 15–27, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.009.

Mwanza B.G., Mbohwa C., Telukdarie A. 2018. The Influence of Waste Collection Systems on Resource Recovery: A Review. *Procedia Manufacturing*, 21, 846–853, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.192.

Nevrlý V. 2014. *Matematické modely v logistice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 41 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Pavel Popela, Ph.D.

Nevrlý V. 2016. *Modely a metody pro svozové úlohy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 48 s., Vedoucí diplomové práce RNDr. Pavel Popela, Ph.D.

Nevrlý V., Šomplák R., Gregor J., Pavlas M., Klemeš J.J. 2017. Impact on the Population from the Transportation of Waste based on Emission Models. *Proceedings of 12th SDEWES Conference, Zagreb, Croatia*, 1–14. ISSN: 1847-7178.

Nevrlý V., Šomplák R., Gregor J., Pavlas M., Klemeš J.J. 2018. Impact assessment of pollutants from waste-related operations as a feature of holistic logistic tool. *Journal of Environmental Management*, 220, 77–86, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.003.

Nevrlý V., Šomplák R., Khýr L., Smejkalová V., Jadrný J. 2019a. Municipal Solid Waste Container Location Based on Walking Distance and Distribution of Population. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 553–558, DOI: 10.3303/CET1976093.

Nevrlý V., Šomplák R., Popela P. 2019b. Heuristics for Waste Collection Arc Routing Problem. *Mendel Journal series*, 25, 1, 15–22, DOI: 10.13164/mendel.2019.1.015.

Nevrlý V., Šomplák R., Popela P., Pavlas M., Osička O., Kúdela J. 2016. Heuristic challenges for spatially distributed waste production identification problems. *Mendel Journal series*, 1, 109–116. ISSN: 1803-3814.

Nevrlý V., Šomplák R., Putna O., Pavlas M. 2019c. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 239, 1, 1–11, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118003.

Nevrlý V., Šomplák R., Smejkalová V. 2019d. Saving of GHG by modifying schedule of waste collection routes. In *Proceedings Sardinia 2019, 17th International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA, 1–10. ISBN: 9788862650144. ISSN: 2282-0027.

Nevrlý V., Šomplák R., Smejkalová V., Lipovský T., Jadrný J. 2021. Location of Municipal Waste Containers: Trade-off Between Criteria. *Journal of Cleaner Production*, 278, 1–13, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123445.

Nowakowski P., Szwarc K., Boryczka U. 2018. Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 1–22, DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.007.

Oppen J., Løkketangen A. 2006. Arc routing in a node routing environment. *Computers & Operations Research*, 33, 4, 1033–1055, DOI: 10.1016/j.cor.2004.09.004.

Orloff C.S. 1974. A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4, 1, 35–64, DOI: 10.1002/net.3230040105.

Pavlas M., Šomplák R., Smejkalová V., Nevrlý V., Zavíralová L., Kúdela J., Popela P. 2017. Spatially distributed production data for supply chain models - Forecasting with hazardous waste. *Journal of Cleaner Production*, 161, 1317–1328, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.107.

Petrasová Z. 2018. Příklady dobré praxe a netradičních systémů sběru odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 68 s., Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Gregor.

Prodhon C., Prins C. 2014. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238, 1, 1–17, DOI: 10.1016/j.ejor.2014.01.005.

Ramos T.R.P., de Moraes C.S., Barbosa-Póvoa A.P. 2018. The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*, 103, 146–158, DOI: 10.1016/j.eswa.2018.03.001.

Ramos T.R.P., Gomes M.I., Barbosa-Póvoa A.P. 2014. Assessing and improving management practices when planning packaging waste collection systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 116–129, DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.013.

Ramos T.R.P., Gomes M.I., Barbosa-Póvoa A.P. 2014. Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 34–54, DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.002.

Ramson S.R.J., Moni D.J. 2017. Wireless sensor networks based smart bin. *Computers & Electrical Engineering*, 64, 337–353, DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.11.030.

Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. 2013. Improvement actions in waste management systems at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation. *Waste Management*, 33, 11, 2568–2578.

Rodrigues S., Martinho G., Pires A. 2016. Waste collection systems. Part A: a taxonomy. *Journal of Cleaner Production*, 113, 374–387, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.143.

Rodrigues S., Martinho G., Pires A. 2016. Waste collection systems. Part B: Benchmarking indicators. Benchmarking of the Great Lisbon Area, Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 139, 230–241, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.146.

Rosecký M. 2018. Aplikace pokročilých regresních modelů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Matematiky, 103 s., Vedoucí práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.

Samanlioglu, F. 2013. A Multi-Objective Mathematical Model for the Industrial Hazardous Waste Location-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 226, 2, 332–340, DOI: 10.1016/j.ejor.2012.11.019.

Santibañez-Aguilar J.E., Flores-Tlacuahuac A., Rivera-Toledo M., Ponce-Ortega J.M. 2017. Dynamic optimization for the planning of a waste management system involving multiple cities. *Journal of Cleaner Production*, 165, 190–203, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.063.

Schiffer M., Walther G. 2018. Strategic planning of electric logistics fleet networks: A robust location-routing approach. *Omega*, 80, 31–42, DOI: 10.1016/j.omega.2017.09.003.

Sheau-Ting L., Sin-Yee T., Weng-Wai C., Preferred Attributes of Waste Separation Behaviour: An Empirical Study. *Procedia Engineering*, 145, 738–745, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.094.

Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Pavlas M. 2017. Heuristic methodology for forecasting of quantities in waste management. *Mendel Journal series*, 1, 185–192. ISSN: 1803-3814.

Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Pavlas M. 2018. Design and Decomposition of Waste Prognostic Model with Hierarchical Structures. *Mendel Journal series*, 1, 85–92. ISSN: 1803-3814.

Šomplák R., Nevrlý V., Gregor J. 2018a. Prognóza produkce BRKO a nákladů na jeho sběr a svoz. *Odpadové fórum: měsíčník o odpadech a druhotných surovinách*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 19, 5, 30–30. ISSN 1212-7779.

Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Gregor J. 2019a. Posouzení a návrh svozových plánů odpadu. In *Sborník konference*. Praha: CEMC, 1–6. ISBN: 978-80-85990-30-0.

Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Jadrný J. 2018b. Prognóza produkce biologicky rozložitelného komunálního odpadu v ČR. In *Sborník konference*. Praha: CEMC, 1–6. ISBN: 978-80-85990-30-0.

Šomplák R., Nevrlý V., Smejkalová V., Šmídová Z., Pavlas M. 2019b. Bulky Waste for Energy Recovery: Analysis of Spatial Distribution. *Energy*, 181, 1, 827–839, DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.175.

Šomplák R., Pavlas M., Kropáč J., Putna O., Procházka V. 2014. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 1275–1286. DOI: 10.1007/s10098-014-0744-5.

Šomplák R., Pavlas M., Nevrlý V., Touš M., Popela P. 2019c. Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1294–1303, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.165.

Tavares G., Zsigraiova Z., Semiao V., Carvalho M.G. 2008. Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29, 3, 1176–1185, DOI: 10.1016/j.wasman.2008.07.013.

Teerioja N., Moliis K., Kuvaja E., Ollikainen M., Punkkinen H., Merta E. 2012. Pneumatic vs. door-to-door waste collection systems in existing urban areas: a comparison of economic performance. *Waste Management*, 32, 10, 1782–1791, DOI: 10.1016/j.wasman.2012.05.027.

Teixeira J., Antunes A.P., de Sousa J.P. 2004. Recyclable waste collection planning – a case study. *European Journal of Operational Research*, 158, 3, 543–554, DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00379-5.

Tirkolaee E.B., Mahdavi I., Esfahani M.M.S. 2018. A robust periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection considering drivers and crew's working time. *Waste Management*, 76, 138–146, DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.015.

Vidal T., Laporte G., Matl P. 2020. A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286, 2, 401–416, DOI: 10.1016/j.ejor.2019.10.010.

Vyhláška č. 93/2016 Sb. Katalag odpadů. Dostupné z https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/0BFE53E10EC910E2C12580A7004BBD A1/%24file/V%2093_2016.pdf, [12.12. 2018].

Weitz K.A., Thorneloe S.A., Nishtala S.R., Yarkosky S., Zannes M. 2002. The Impact of Municipal Solid Waste Management on Greenhouse Gas Emissions in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, 9, 1000–1011, DOI: 10.1080/10473289.2002.10470843.

Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Sbírka zákonů České republiky, část šestá, § 39 a 40. Dostupný také z <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf>, [12. 12. 2018].

ZERA – zemědělská a ekologická regionální agentura, z.s. 2016. Studie řešení nakládání s bioodpadem vzniklým na území měst Tábor, Sezimovo Ústí a Planá nad Lužnicí.

Zhang D.Q., Tan S.K., Gersberg R.M. 2010. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *Journal of Environmental Management*, 91, 8, 2010, 1623–1633, DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.03.012.

